ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР

РУКОВОДСТВО
ПО РАСЧЕТУ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ДЕЙСТВИЕ ВЕТРА



МОСКВА 1978

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ им. В. А. КУЧЕРЕНКО
ГОССТРОЯ СССР

РУКОВОДСТВО
ПО РАСЧЕТУ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ДЕЙСТВИЕ ВЕТРА



МОСКВА СТРОЙИЗДАТ 1978

УДК 624.042.4

Рекомендовано к изданию секцией динамики сооружений научно-технического совета ЦНИИСК им. Кучеренко.

Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. — М.: Стройиздат, 1978. ... с. /Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций им. В. А. Кучеренко.

Руководство содержит рекомендации по определению ветровой нагрузки на здания и сооружения и указания по динамическому расчету высоких сооружений на действие ветра. В приложениях приведено обоснование основных положений и метода динамического расчета и даны примеры расчета зданий и сооружений на действие ветра.

Руководство предназначено для инженерно-технических работников проектных и научно-исследовательских институтов.

Табл. 58, рис. 55.

Р $\frac{30213-523}{047(01)-78}$ Инструкт.-нормат., II вып.—47—77

ПРЕДИСЛОВИЕ

Руководство составлено к главе СНиП II-6-74 «Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования».

В Руководстве приведены основные положения по определению ветровой нагрузки на здания и сооружения, а также указания по динамическому расчету высоких сооружений башенного типа (башни, дымовые трубы и т. п.), высоких зданий, антенно-мачтовых систем, градирен и др.

Рассмотрены вопросы аэродинамического возбуждения высоких сооружений и гибких призматических конструкций.

В прил. 1 приведены аэродинамические коэффициенты для зданий, сооружений и конструкций.

Прил. 2 содержит обоснование основных положений по определению статической составляющей ветровой нагрузки и метода динамического расчета высоких зданий и сооружений на действие турбулентного ветра.

В прил. 3 даны примеры расчета высоких зданий и сооружений на действие ветра.

В Руководстве единицы физических величин приняты в системе СИ. Таблица соотношений между единицами этой системы и технической системы МКГСС дана в прил. 4.

Руководство разработано в отделении динамики сооружений Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций им. В. А. Кучеренко канд. техн. наук М. Ф. Барштейном.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящее Руководство составлено к главе СНиП II-6-74 «Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования» и распространяется на проектирование промышленных, гражданских и сельскохозяйственных зданий и сооружений.

1.2. Здания и сооружения, проектируемые с учетом настоящего Руководства, должны удовлетворять требованиям главы СНиП II-6-74 «Нагрузки и воздействия», а также требованиям, предъявляемым действующими нормативными документами к аналогичным зданиям и сооружениям.

1.3. Ветровая нагрузка на здания и сооружения должна определяться как сумма статической и динамической составляющих.

Статическая составляющая, соответствующая установившемуся скоростному напору, должна учитываться во всех случаях. Динамическая составляющая, вызываемая пульсациями скоростного напора, должна учитываться при расчете: сооружений с периодом собственных колебаний более 0,25 с (мачт, башен, дымовых труб, опор линий электропередачи, аппаратов колонного типа, транспортерных галерей, открытых этажерок и т. п.); многоэтажных зданий высотой более 40 м; поперечных рам одноэтажных однопролетных производственных зданий высотой более 36 м при отношении высоты к пролету более 1,5.

1.4. Для высоких сооружений круговой цилиндрической формы (дымовых труб, мачт и т. п.) необходимо также производить поверочный расчет на резонанс, возникающий при таких скоростях ветра, когда частота срыва вихрей совпадает с собственной частотой колебаний сооружений поперек потока.

Примечание. В гибких призматических конструкциях при определенных скоростях ветра могут возникнуть колебания поперек потока, связанные с явлением аэродинамической неустойчивости таких тел. Указания по расчету и мероприятия по уменьшению колебаний таких конструкций устанавливаются на основании данных аэродинамических испытаний.

2. НОРМАТИВНОЕ ЗНАЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЕРЕГРУЗКИ

2.1. Нормативное значение статической составляющей ветровой нагрузки $q_н^с(z)$ должно определяться по формуле

$$q_н^с(z) = q_{0t}(z)\,c, \quad Па, \qquad (1)$$

где

$$q_{0t}(z) = q_0 k_t(z);$$

$q_0 = \rho v_0^2/2$ — нормативный скоростной напор ветра на высоте 10 м над поверхностью земли, принимаемый по п. 3.1; ρ — плотность воздуха, кг/м³; v_0 — скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью земли, м/с; $k_t(z)$ — коэффициент, учитывающий изменение скоростного напора по высоте, принимаемый в соответствии с указаниями, изложенными в пп. 4.1—4.4; c — аэродинамический коэффициент, принимаемый по табл. 1, прил. 1.

2.2. Коэффициент перегрузки для ветровой нагрузки на здания $n_п$ должен приниматься равным 1,2; на высокие сооружения, где ветровая нагрузка имеет решающее значение, $n_п=1{,}3$, если в нормах проектирования этих сооружений не приводится другое значение этого коэффициента. Коэффициент перегрузки $n_п$ для дымовых труб высотой от 150 до 300 м рекомендуется принимать равным 1,4, выше 300 м — 1,5.

3. НОРМАТИВНЫЕ СКОРОСТНЫЕ НАПОРЫ

3.1. Нормативный скоростной напор ветра (q_0) для данного географического района устанавливается на основе статистического анализа климатологических данных по скоростям ветра в этом районе (районы СССР принимаются по карте, приведенной в главе СНиП II-6-74 «Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования»).

Скоростные напоры q_0 в зависимости от района СССР должны приниматься по табл. 1.

Таблица 1

Районы СССР	I	II	III	IV	V	VI	VII
Скоростной напор, Па	270	350	450	550	700	850	1000

Для обозначенных на карте горных и мало изученных районов скоростной напор ветра допускается уточнять по данным Гидрометеорологической службы, а также по результатам обследования районов строительства с учетом опыта эксплуатации. При корректировке нормативный скоростной напор допускается определять по формуле

$$q_0 = 0.613\,(\alpha v_0)^2, \quad \text{Па}, \tag{2}$$

где v_0 — скорость ветра (при двухминутном интервале осреднения), превышаемая в среднем один раз в пять лет, если техническими условиями, утвержденными в установленном порядке, не регламентированы другие периоды повторяемости скорости ветра; $\alpha=0{,}75+\frac{5}{v_0}$ — коэффициент к скоростям ветра, полученным из обработки наблюдений по флюгеру, принимаемый не более единицы; при использовании малоинерционных анемометров коэффициент α принимается равным единице.

Указания по определению скорости ветра заданной обеспеченности (с заданным периодом повторяемости) даны в п. 3, прил. 2.

3.2. В случаях когда при расчете здания (сооружения) имеют значения ветры одного-двух румбов, допускается при наличии достоверных данных о скоростях ветра по различным направлениям учитывать направление ветра и определять его скорость заданной обеспеченности по указаниям п. 3, прил. 2.

4. ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТНЫХ НАПОРОВ ВЕТРА ПО ВЫСОТЕ

4.1. Для определения скоростного напора ветра $q_{0t}(z)$ по высоте сооружения используется степенной закон изменения нормативной скорости ветра с высотой в нижнем слое атмосферы. Показатель степени в этом законе зависит от шероховатости подстилающей поверхности и от самой скорости ветра (см. п. 4, прил. 2).

В зависимости от шероховатости подстилающей поверхности земли различают местности типа А, Б и В. К типу А относятся открытые местности (степи, лесостепи, пустыни, открытые побережья морей, озер, водохранилищ). К типу Б относятся города, лесные массивы и тому подобные местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м. К типу В относятся районы крупных городов, имеющие не менее 50% зданий восьми и более этажей.

В главе СНиП II-6-74 приняты два профиля для нормативных скоростных напоров: один для открытой местности (тип А), другой для городов и лесных массивов (тип Б).

Жилые районы в крупных городах со зданиями повышенной этажности и высокими зданиями (25—30 этажей) при надлежащем обосновании могут быть отнесены к местности типа В.

Вертикальные профили скоростных напоров для местности типа Б и В применяются в тех случаях, когда эти местности в направлении действия ветра имеют протяженность не менее 1,5—2 км, при этом в зависимости от шероховатости эти профили могут меняться для разных направлений.

Для сооружений, возводимых в открытом море, скоростной напор определяется по скорости, записанной в районе расположения сооружения.

Значения коэффициентов $k_t(z)$ $(t=\text{А, Б, В})$, учитывающих изменение скоростного напора в зависимости от высоты и типа местности, определяются по табл. 2.

Таблица 2

Тип местности	Коэффициент $k_t(z)$ при высоте над поверхностью земли, м							
	до 10	20	30	40	60	100	200	350 и выше
А	1	1,25	1,4	1,55	1,75	2,1	2,6	3,1
Б	0,65	0,9	1,05	1,2	1,45	1,8	2,45	3,1
В	0,3	0,5	0,6	0,75	1	1,4	2,2	3,1
Открытое море	1	1,15	1,25	1,3	1,4	1,5	—	—

Примечание. Для промежуточных высот значение $k_t(z)$ допускается определять линейной интерполяцией данных табл. 2. В пределах отдельных зон зданий и сооружений при высоте каждой зоны не более 10 м величину коэффициентов $k_t(z)$ допускается принимать постоянной.

4.2. Вертикальные профили нормативных скоростных напоров на границе двух подстилающих поверхностей с различной степенью

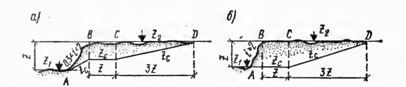


Рис. 1. Условные уровни z_c, от которых отсчитывается высота сооружения

а — в точке *A*: $z_c = z_1$; на участке *BC* $z_c = z_1 + \frac{2-i}{1,7} z$; за точкой *D* $z_c = z_2$. На участках *AB* и *CD* z_c определяется линейной интерполяцией; *б* — на участках *AB* и *BC*: $z_c = z_1$; за точкой *D* $z_c = z_2$

защищенности (см. п. 4, прил. 2) определяются по формулам:

$$\text{при } z > \delta \quad q_{01}(z) = q_0 k_1(z);$$

$$\text{при } z < \delta \quad q_{01}(z) = q_0 k_1(\delta)(z/\delta)^{2\alpha_2}, \tag{3}$$

$$\text{где } k_1(z) = k_1(10)(z/10)^{2\alpha_1}.$$

Параметр $k_1(10)$ относится к местности, расположенной выше по потоку, принимается по табл. 2. Показатели степени α_1 и α_2 относятся к местностям, расположенным соответственно выше и ниже по потоку.

Глубина внутреннего пограничного слоя δ, зависящая от расстояния x от границы до точки, для которой строится переходной профиль, принимается по табл. 3.

Таблица 3

Граница местностей типа	α_1	α_2	Глубина пограничного слоя δ при расстоянии x, м			
			50	200	500	2000
А и Б	0,16	0,22	11	35	70	215
Б и В	0,22	0,33	19	55	110	340
Б и А	0,22	0,16	9	22	55	165
В и Б	0,33	0,22	13	42	90	260

4.3. Для зданий высотой до 5 м, расположенных на местности типа А, скоростной напор, определяемый по табл. 1, допускается снижать на 25%.

4.4. Для зданий высотой до 40 м, расположенных в местности типа В, скоростной напор принимается как для местности типа Б.

4.5. Если поверхность земли вокруг здания не горизонтальна, то при уклоне $i \leqslant 0,3$ высота сооружения H определяется от его основания.

При уклонах $0,3 < i < 2$ и $i \geqslant 2$ условный уровень z_c, от которого отсчитывается высота сооружения, определяется по рис. 1.

5. ВЕТРОВАЯ НАГРУЗКА НА ЗДАНИЯ, СООРУЖЕНИЯ И КОНСТРУКЦИИ. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

5.1. Ветровая нагрузка на здания (сооружения) зависит от их формы, положения в пространстве и проницаемости ограждений.

Различают многоугольные (квадратные, прямоугольные и т. п.) и круглые в плане здания и сооружения, навесы, решетчатые сооружения, конструкции специальных форм.

По своему положению в пространстве конструкции могут быть установлены на поверхности земли или примыкать к плоскостям больших размеров; аэродинамически изолированы в пространстве, если расстояние до земли или до соседней стены более их размера по вертикали или по нормали к стене; заключены между двумя параллельными плоскостями больших размеров.

Конструкции, расположенные на поверхности земли и примыкающие к плоскости больших размеров (другое здание или стена), с аэродинамической точки зрения подобны конструкции высотой $2H$ (рис. 2, *а*) или длиной $2B$ (рис. 2, *б*). Конструкции расположенные на поверхности земли и заключенные между двумя параллельными плоскостями больших размеров, подобны конструкции с бесконечной длиной (рис. 2, *в*).

Проницаемостью ограждения μ, %, называется отношение суммарной площади проемов ограждения отдельной грани здания к ее общей площади.

Различают здания закрытые, имеющие небольшие равномерно распределенные проемы со средней проницаемостью ограждений $\mu \leq 5\%$. При $\mu = 0$ здание герметически закрыто. Жилые и гражданские здания практически являются закрытыми зданиями; частично открытые с ограждениями, имеющими среднюю проницаемость $5\% < \mu < 30\%$; открытые со средней проницаемостью ограждения $\mu > 30\%$. Частично открытые и открытые здания имеют одну или несколько стен, открытых частично или полностью.

Примечание. При проектировании зданий необходимо учитывать, что в ряде случаев давление ветра на здание в процессе монтажа (при отсутствии наружных стен) может быть больше, чем в законченном здании.

5.2. Схемы распределения ветровой нагрузки и значения аэродинамических коэффициентов c должны приниматься в соответствии с указаниями табл. 1, прил. 1; при этом промежуточные значения коэффициентов допускается определять линейной интерполяцией.

Аэродинамические коэффициенты принимаются:

а) для отдельных поверхностей или точек зданий и сооружений — как коэффициенты давления, которые следует учитывать при определении ветровой нагрузки, нормальной к рассматриваемой поверхности и относящейся к единице площади этой поверхности.

Положительным значениям коэффициента давления соответствует направление давления к поверхности сооружения, а отрицательным значениям — направление от поверхности сооружения.

Поверхности, подверженные непосредственному воздействию потока ветра, называются наветренными, заветренные поверхности воспринимают воздействия отсоса (отрицательного давления). Ко-

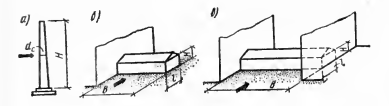


Рис. 2. Положение конструкции в пространстве

а, *б* — конструкция расположена на поверхности земли или примыкает к плоскости больших размеров; *в* — конструкция заключена между двумя параллельными плоскостями больших размеров

эффициенты давления изменяются от точки к точке поверхности. Для простоты при определении ветровой нагрузки принимаются их значения, осредненные по отдельным граням или зонам поверхности;

б) для отдельных элементов и конструкций — как коэффициенты лобового сопротивления c_x и поперечной силы c_y, которые следует учитывать при определении составляющих общего сопротивления тела, действующих по направлению скорости потока и перпендикулярно ему и относящихся к площади проекции тела на плоскость, перпендикулярную потоку, и как коэффициент подъемной силы c_z при определении вертикальной составляющей общего сопротивления тела. Последняя относится к площади проекции тела на горизонтальную плоскость;

в) при направлении ветра под углом α к наветренной стороне конструкции — как коэффициенты c_n и c_t, которые должны учитываться при определении составляющих общего сопротивления тела, действующих в направлении его осей и относящихся к площади наветренной грани.

В случаях, не предусмотренных табл. 1, прил. 1 (иные формы зданий и сооружений, учет при надлежащем обосновании других направлений ветрового потока или составляющих общего сопротивления тела по другим направлениям и т. п.), аэродинамические коэффициенты необходимо принимать по справочным и экспериментальным данным.

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

5.3. Коэффициенты давления принимаются: для наветренных вертикальных поверхностей $c=+0{,}8$, для заветренных $c=-0{,}6$.

Для вертикальных и отклоняющихся от вертикальных не более чем на 15° поверхностей в зданиях с многорядным расположением фонарей и другим сложным профилем (если в табл. 1, прил. 1 нет соответствующих схем) коэффициенты давления принимаются для крайних и возвышающихся промежуточных поверхностей: наветренных $c=+0{,}7$, заветренных $c=-0{,}6$; для промежуточных поверхностей (наветренных и заветренных) $c=-0{,}5$.

Ветровая нагрузка на вертикальную стену равна разности нагрузок на наветренную и заветренную плоскости стены. Коэффици-

енты давления для этих плоскостей учитываются со своими знаками. Принимается, что плоский характер стен не нарушается выступами, балконами, лоджиями.

ЗАКОНЫ ПОДОБИЯ. СОСТАВЛЯЮЩИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ

5.4. Ветровая нагрузка на тело заданной формы, обтекаемое установившимся потоком, определяется по формуле

$$Q = \frac{1}{2}\rho v^2 S \Phi(\rho, \mu, v, \alpha, d), \qquad (4)$$

где S и d — характеристические площадь и размер тела; v — скорость невозмущенного потока; ρ — плотность воздуха; μ — его вязкость, α — угол, который определяет направление скорости; Φ — некоторый безразмерный параметр. Последний является функцией α и Re, где $\mathrm{Re} = \frac{vd}{\nu}$, здесь $\nu = \mu/\rho$ — кинематическая вязкость воздуха. Величина Re называется числом Рейнольдса. Она характеризует зависимость сопротивления от вязкости воздуха.

Из выражения $Q = \frac{1}{2}\rho v^2 S \Phi(\alpha, \mathrm{Re})$ можно установить, что течения одинакового типа с одинаковым числом Рейнольдса динамически подобны.

Для неустановившегося движения воздуха, пользуются критерием подобия Струхаля $\mathrm{Sh} = nd/v$, где n — частота срыва вихрей.

Законы подобия играют важную роль в экспериментальной аэродинамике. Чтобы добиться соответствия между модельным испытанием и натурными условиями, модельный поток по интенсивности турбулентности и по профилю скорости должен соответствовать потоку ветра.

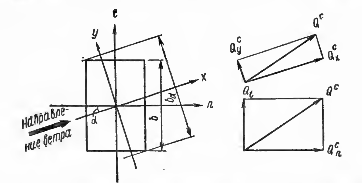


Рис. 3. Составляющие равнодействующей ветрового давления в направлении ветра Q_x^c и перпендикулярно к нему Q_y^c и в направлении осей конструкции Q_n^c и Q_t^c

5.5. Нормативное значение равнодействующей ветрового давления на отдельные элементы и конструкции определяется по формуле

$$Q_{н}^{c}(z) = c q_{0t}(z) S. \quad (5)$$

Для составляющих $Q_{н}^{c}(z)$ в направлении скорости ветра (лобового сопротивления) $Q_{xн}^{c}(z)$ и в перпендикулярном к ней направлении (поперечной силы) $Q_{yн}^{c}(z)$ аэродинамический коэффициент c соответствует коэффициентам c_x и c_y, для составляющих $Q_{н}^{c}(z)$ в направлении осей конструкции — коэффициентам c_n и c_t (рис. 3).

Аэродинамические коэффициенты c_n и c_t совпадают с c_x и c_y при ветре, нормальном к наветренной грани.

ОДНОЭТАЖНЫЕ ЗДАНИЯ

5.6. Для зданий (пп. 1—7, табл. 1, прил. 1) с открывающимися проемами (окна, ворота, двери), равномерно распределенными по периметру здания, или проницаемыми стенами из асбестоцементных или других листов (независимо от наличия проемов) при расчете ограждений наружных стен, стоек и ригелей фахверка, импостов остекления значения аэродинамических коэффициентов для ограждения должны приниматься равными: $c = +1$ — при расчете на положительное давление; $c = -0{,}8$ — при расчете на отрицательное давление.

5.7. При расчете поперечных рам зданий с продольными фонарями или с зенитными (при $a > 4h$) фонарями (пп. 4, 5, 7, табл. 1, прил. 1) учитывается ветровая нагрузка, действующая на наветренные и заветренные стойки рамы, и горизонтальная составляющая ветровой нагрузки, действующая на фонари.

Распределение ветровой нагрузки на здания с продольными фонарями, приведенное в пп. 4, 5, табл. 1, прил. 1, принимается при $a < 4h$; при $a > 4h$ схема ветровой нагрузки принимается по п. 7 указанной таблицы.

Для зданий с шедовыми покрытиями (п. 6 той же таблицы) или с зенитными фонарями при $a \leqslant 4h$ вместо горизонтальных составляющих, действующих на второй (от наветренной стороны здания) и последующие фонари, должна быть учтена сила трения $F_т$, определяемая по формуле

$$F_т = (0{,}001\alpha + 0{,}02)\, q_0\, k_t(z)\, S n_п, \quad (6)$$

где α — угол наклона наветренной грани фонаря к горизонту, град; $k_t(z)$ — коэффициент, принимаемый по табл. 2, прил. 1; S — площадь горизонтальной проекции покрытия здания (без площади первого фонаря); $n_п$ — коэффициент перегрузки (п. 2.2).

ВНУТРЕННЕЕ ДАВЛЕНИЕ В ЗДАНИЯХ

5.8. Внутреннее давление в помещениях одноэтажных и многоэтажных зданий равно давлению на внешнюю поверхность рассматриваемого помещения. В тех случаях когда на одном или нескольких фасадах имеются участки различной проницаемости,

внутреннее давление для каждого помещения устанавливается соответственно его проницаемости и направлению ветра.

В закрытых зданиях с проницаемостью ограждений $\mu \leq 5$ коэффициент внутреннего давления $c_в$ во всех помещениях принимается равным $\pm 0{,}2$ (п. 11а, табл. 1, прил. 1).

В зданиях с одной открытой стеной, имеющей $\mu > 30$ (другие стены имеют проницаемость $\mu < 5$), коэффициенты $c_в$ принимаются, если открыта сторона здания:

наветренная — по п. 11б;

заветренная — по п. 11в;

параллельная ветру — по п. 11г.

В зданиях с двумя открытыми стенами, имеющими $\mu > 30$ (другие стены имеют проницаемость $\mu < 5$), коэффициенты $c_в$ принимаются, если открыты стороны здания:

наветренная и заветренная — по п. 11д;

параллельные ветру — по п. 11е.

Если здание имеет стены с проницаемостью $30 > \mu > 5$, то коэффициенты $c_в$ определяются линейной интерполяцией между их значениями для закрытого и открытого с одной стороны здания. Так, если наветренная стена здания имеет $\mu = 15$, а другие стены $\mu < 5$, то для наветренной грани $c_в = -0{,}3$, для других стен

$$c_в = 0{,}3 + 0{,}5 \frac{15-5}{30-5} = 0{,}5;$$

Ветровая нагрузка на конструктивные элементы ограждения определяется путем суммирования действующих на них внешнего и внутреннего давления.

5.9. В закрытых одноэтажных промышленных зданиях (пп. 1—7, табл. 1, прил. 1) и в многоэтажных зданиях высотой до 30 м расчетная ветровая нагрузка на внутренние стены должна приниматься равной $0{,}4q_0$, на легкие перегородки (весом не более 100 даН/м²) — $0{,}2q_0$, но не менее 100 Па.

При высоте зданий более 30 м расчетная ветровая нагрузка на внутренние стены и перегородки определяется с учетом коэффициента $k_t(z)$, принимаемого по табл. 2 для местности типа Б.

Расчетная ветровая нагрузка на внутренние стены и перегородки многоэтажного здания, монтируемые одновременно с его каркасом при отсутствии наружного стенового ограждения, принимается по эксплуатационному случаю с учетом того, что в период монтажа здания они могут быть дополнительно раскреплены.

ВЫСОКИЕ ЗДАНИЯ

5.10. Для прямоугольных и квадратных в плане зданий повышенной и большой этажности коэффициенты лобового сопротивления определяются по табл. 4 в зависимости от $\frac{H}{B}$ и $\frac{l}{B}$, где H — высота здания, l — его ширина (размер в направлении потока), B — длина наветренной грани здания.

Промежуточные значения коэффициентов допускается определять линейной интерполяцией между указанными в таблице значениями.

В таком здании при $l/B=0{,}2$—0,5 давление ветра по его наветренной и заветренной граням распределяется неравномерно. Эксцентриситет равнодействующей этого давления относительно центра наветренной грани, возникающий при угле между направлениями потока ветра и нормалью к этой грани порядка 40—50°, может быть принят равным 0,15 B.

Аэродинамические коэффициенты c_n для этих углов атаки ветра, определяемые как разность коэффициентов давления на наветренную и заветренную грани, могут быть приняты равными 1,1 при $l/B=0{,}5$ и 1,3 — при $l/B=0{,}2$; коэффициент $c_t=0{,}5$.

5.11. Для здания с лоджиями в продольных стенах при ветре, нормальном к торцу, кроме ветровой нагрузки, определяемой в соответствии с пп. 2.1 и 2.2, для каждой стены с лоджиями должна быть учтена сила трения $F_т=0{,}1q_0k_t(z)Sn_п$, где $S=HB$ — площадь продольной стены.

Таблица 4

l/B	H/B	
	1	7
0,2	1,2	1,35
0,5	1,25	1,4
1—1,5	1,3	1,4
2	1,2	1,3
3	1,1	1,15

СООРУЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ И СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

5.12. Высокие сооружения цилиндрической формы (дымовые трубы, мачты, градирни и т. п.) и элементы сквозных сооружений (трубчатые или из прокатных профилей) относятся к классу плохо обтекаемых тел.

Вследствие наличия трения в воздухе, около такого тела (например, бесконечного цилиндра), обтекаемого воздушным потоком, образуется так называемый пограничный слой, в котором скорость потока быстро падает до нуля у поверхности тела. Толщина этого слоя зависит от вязкости среды.

В начале движения, когда скорость мала, поток вокруг тела приближается к потенциальному. Пограничный слой служит своего рода прослойкой между потоком и цилиндром, и если в критических точках имеется повышенное давление, то оно передается телу через пограничный слой. Этим давлением пограничный слой как бы вытесняется к точкам В и Д, вследствие чего возникают течения от А к В и Д и от С к В и Д; с другой стороны, пограничную зону обтекает потенциальный поток. От этих противоположных токов за точками В и Д образуются симметричные парные вихри, которые смываются потоком. Такое расположение вихрей, однако, не является устойчивым, поэтому при дальнейшем увеличении скорости и соответственно числа Рейнольдса расположение вихрей становится асимметричным. Вихри отрываются попеременно с обеих сторон цилиндра, правильно чередуясь через определенные промежутки времени и образуя вихревую дорожку, которая называтся дорожкой Бенара — Кармана (рис. 4). Этот тип движения сохраняется в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Наконец, при $Re=10^5$—$2\cdot10^5$ пограничный слой становится турбулентным и срывается с поверхности цилиндра.

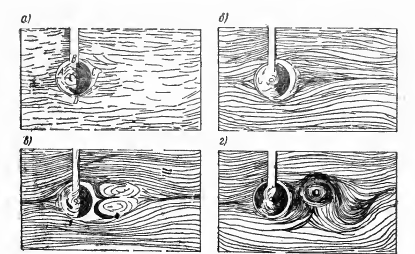


Рис. 4. Характер обтекания цилиндра потоком жидкости

а — начало движения цилиндра; *б* — зарождение вихрей за цилиндром; *в* — неустойчивое состояние парных вихрей; *г* — периодический срыв вихрей за цилиндром

Турбулизация пограничного слоя приводит к заметному смещению линии отрыва вихрей по направлению к концу тела, так что область вихреобразований — турбулентный след за телом сужается, что приводит к уменьшению силы сопротивления. Коэффициент лобового сопротивления падает в несколько раз в сравнительно узком интервале чисел Рейнольдса. Это явление называется кризисом сопротивления.

На явление кризиса влияет степень турбулентности набегающего на тело потока. Чем она больше, тем ранее (при меньших Re) наступает турбулизация пограничного слоя.

Различают следующие области изменения коэффициента c_x при увеличении Re: докритическая при $Re<1{,}5\cdot10^5$, критическая при $1{,}5\cdot10^5<Re<8\cdot10^5$, закритическая при $8\cdot10^5<Re<10^7$ и транскритическая при $Re>10^7$.

Периодический отрыв вихрей наблюдается при обтекании не только цилиндров, но также и других тел. Однако для призматического тела линии отрыва вихрей совпадают с угловыми точками поперечного сечения; коэффициент c_x для таких тел от числа Рейнольдса практически не зависит.

В пп. 12—20, табл. 1, прил. 1 приведены схемы распределения ветровой нагрузки и аэродинамические коэффициенты (коэффициенты давления и лобового сопротивления) для сферы, сооружений с круговой цилиндрической поверхностью (резервуары, башни, дымовые трубы), эллиптического цилиндра, цилиндрических панелей кругового и эллиптического поперечных сечений, аппаратов колонного типа и конструкций, образуемых из сфер. Там же даны коэф-

фициенты c_x для цилиндров с ребрами (выступами), для проводов и тросов.

5.13. Коэффициенты давления для оболочки градирни, наружная поверхность которой не имеет меридиональных ребер (умеренно шероховатая поверхность), принимаются по п. 12, табл. 1, прил. 1 для $H/d=1$. Коэффициенты давления для оболочки градирни с меридиональными ребрами, расположенными на расстоянии не более 1/50 длины окружности, и отношением высоты ребра к среднему диаметру оболочки $\delta/d \geqslant 3{,}5 \cdot 10^{-4}$ (с шероховатой наружной поверхностью) принимаются по п. 14, табл. 1, прил. 1. Там же приведены коэффициенты разложения в ряд Фурье эпюры давления ветра по поверхности оболочки для умеренно шероховатых и шероховатых поверхностей.

Кроме внешнего давления на оболочку должно учитываться также распределенное по ее поверхности внутреннее давление с коэффициентом $c_в=-0{,}5$.

5.14. Нормальное к хорде ванты или наклонного трубчатого элемента нормативное значение ветровой нагрузки определяется по формуле

$$Q^c_н(z) = q_0\, k_t(z)\, c_\Theta\, S, \tag{7}$$

где $c_\Theta = c_{x\Theta} \sin\theta + c_{z\Theta} \cos\theta$; θ—угол между вантой и направлением ветра; $\cos\theta = \cos\alpha \cos\varphi$; α — угол наклона ванты к горизонту; φ — угол между плоскостями действия ветра и ванты (см. п. 21, табл. 1, прил. 1).

Для элементов с $Re \leqslant 1{,}5 \cdot 10^5$ аэродинамические коэффициенты $c_{x\Theta}$ и $c_{z\Theta}$ принимаются по табл. 5.

Таблица 5

$\theta°$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$c_{x\theta}$	0,05	0,1	0,2	0,35	0,6	0,8	1,03	1,16	1,2
$c_{z\theta}$	0,04	0,15	0,27	0,36	0,45	0,43	0,33	0,18	0

Если плоскости действия ветра и ванты совпадают ($\varphi=0$), то $\alpha=\theta$.

Приближенные значения c_Θ и c_α могут быть вычислены по формулам, приведенным в упомянутом п. 21.

РЕШЕТЧАТЫЕ КОНСТРУКЦИИ

5.15. Аэродинамические коэффициенты c_n и c_t для конструктивных элементов решетчатых конструкций из простых и составных профилей приведены в табл. 2, прил. 1. Они зависят от угла атаки α и от отношения λ высоты элемента к его характеристическому размеру.

Нормативное значение ветровой нагрузки на такие элементы определяется по формулам

$$Q^c_{nн}(z) = k_l\, c_{n\infty}\, q_{0t}(z)\, S \quad \text{и} \quad Q^c_{tн}(z) = k_l\, c_{t\infty}\, q_{0t}(z)\, S,$$

где $c_{n\infty}$ и $c_{t\infty}$ — аэродинамические коэффициенты для элемента бесконечной длины; k_l — коэффициент перехода от элемента бесконечной длины к элементу с отношением λ.

В главе СНиП II-6-74 коэффициент лобового сопротивления для элементов решетчатых конструкций принят равным 1,4 независимо от отношения λ и направления ветра. Рекомендуемый коэффициент c_x (п. 22, табл. 1, прил. 1) соответствует $\lambda = l/h_\alpha = 10—15$ и $k_l = 0,65—0,70$.

Указания по определению коэффициентов лобового сопротивления для плоских и пространственных решетчатых конструкций даны в пп. 22—25, табл. 1, прил. 1.

ВЕТРОВАЯ НАГРУЗКА НА РАЗЛИЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

5.16. Давление ветра на уровне перекрытия открытой этажерки определяется путем суммирования давления на ее несущие конструкции (стойки, ригели, второстепенные балки и ребра настила) и на технологическое оборудование (аппараты и связанные с ними трубопроводы), установленное на перекрытие этажерки. Давление ветра на трубопроводы учитывается умножением давления ветра на оборудование на коэффициент 1,1.

Давление ветра на ограждение площадок и лестниц аппаратов колонного типа определяется в соответствии с п. 23, табл. 1, прил. 1, при этом коэффициент заполнения φ принимается равным 0,3.

5.17. Ветровая нагрузка на конус с основанием в виде круга или на пирамиду с квадратным основанием (при $1,5d \leqslant H \leqslant 2,5d$ и $1,5a \leqslant H \leqslant 2,5a$; d и a — диаметр и сторона оснований конуса и пирамиды) определяется по формулам

$$Q_x^c = c_x q_{cp} S \text{ и } Q_z^c = c_z q_{cp} S_z, \qquad (8)$$

где коэффициенты c_x и c_z принимаются по п. 32, табл. 1, прил. 1; q_{cp} — средний скоростной напор ветра по высоте сооружения; S — площадь проекции сооружения на плоскость, перпендикулярную направлению ветра; S_z — площадь основания конуса или пирамиды; коэффициенты давления c на участках, близких к вершине конуса, имеющего уклон 45°, могут принимать значения от —1,5 до —3,5.

5.18. Коэффициент лобового сопротивления для флагов $c_x = 1,4$. Для натянутого флага учитывается вся его площадь, подверженная действию ветра; для свободно висящего флага — $^1/_4$ его площади.

МЕСТНОЕ ДАВЛЕНИЕ ВЕТРА

5.19. При расчете креплений элементов ограждения к несущим конструкциям в углах зданий и по внешнему контуру покрытий должно учитываться местное отрицательное давление ветра, распределенное вдоль ребер на ширине, равной одной десятой от соответствующего линейного размера (длина, ширина, высота) зданий, но не более 1,5 м (заштрихованные участки на рис. 5). Значение коэффициента давления принимается равным $c = -2$.

При углах наклона ската кровли $\alpha > 40°$ местное давление не учитывается. Для сводчатого покрытия учитывается угол α, образованный касательной в начале свода с горизонтом.

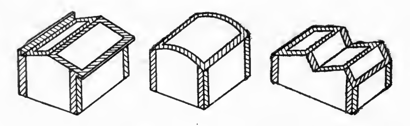


Рис. 5. Участки с повышенным отрицательным давлением для расчета креплений элементов

6. ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЫСОКИХ СООРУЖЕНИЙ И ЗДАНИЙ НА ДЕЙСТВИЕ ВЕТРА

СООРУЖЕНИЯ БАШЕННОГО ТИПА

6.1. К сооружениям башенного типа относятся: дымовые трубы, башни, опоры линий электропередачи, аппараты колонного типа и тому подобные сооружения. В качестве расчетной схемы таких сооружений принимается защемленный в основание консольный стержень постоянного или переменного по высоте сечения.

6.2. Нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки должно определяться для каждой формы колебаний сооружения в виде системы инерционных сил, приложенных к середине участков, на которые условно разбивается сооружение.

Инерционная сила, кН, приложенная в середине участка с номером j при колебаниях сооружения по i-ой собственной форме должна определяться по формуле

$$Q^{д}_{ijH} = M_j \xi_i \eta_{ij} \nu, \tag{9}$$

где M_j — масса j-го участка, т, сосредоточенная в его середине; ξ_i — коэффициент динамичности, принимаемый в соответствии с п. 6.3; η_{ij} — приведенное ускорение, м/с^2, середины j-го участка, принимаемое в соответствии с п. 6.4; ν — коэффициент, учитывающий пространственную корреляцию пульсации скорости ветра по высоте сооружения и принимаемый в соответствии с п. 6.5.

6.3. Коэффициент динамичности ξ_i допускается определять по графикам рис. 6 в зависимости от параметра $\varepsilon_i = T_i v/1200$ и от

Таблица 6

ε_i	ξ_i		
	$\delta=0,05$	$\delta=0,15$	$\delta=0,3$
0,25	4,96	2,93	2,13
0,3	5,17	3,04	2,2
0,4	5,44	3,18	2,28
0,45	5,52	3,21	2,3
0,5	5,57	3,23	2,3

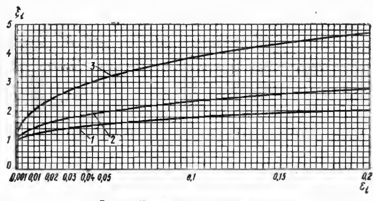


Рис. 6. Коэффициент динамичности

1 — для железобетонных и каменных сооружений, а также для зданий со стальным каркасом при наличии ограждающих конструкций ($\delta=0,30$); *2* — для стальных башен, мачт, футерованных дымовых труб, аппаратов колонного типа, в том числе на железобетонных постаментах ($\delta=0,15$); *3* — для стальных сооружений и конструкций при совместном учете резонансных колебаний и динамической составляющей ветровой нагрузки в плоскости потока ($\delta=0,05$)

логарифмического декремента колебаний δ (T_i — период i-й формы собственных колебаний, с; $v = 1{,}28\sqrt{n_п q_0}$ — расчетная скорость ветра, м/с; $n_п$ — коэффициент перегрузки, принимаемый по п. 2.2.

Коэффициенты ξ_i для значений $\varepsilon_i > 0{,}2$ приведены в табл. 6.

6.4. Приведенное ускорение η_{ij}, м/с², допускается определять по формуле

$$\eta_{ij} = \frac{\alpha_{ij} \sum_{k=1}^{r} \alpha_{ik} Q^{с}_{нk} m_k}{\sum_{k=1}^{r} \alpha_{ik}^2 M_k}, \qquad (10)$$

где M_k — масса k-го участка; α_{ij}, α_{ik} — относительные ординаты, соответствующие середине j-го и k-го участков при колебаниях сооружения по i-ой форме; $Q^{с}_{нk}$ — равнодействующая нормативной ветровой нагрузки $q^{с}_{н}$ на k-й участок, определяемая в соответствии с пп. 2.1. и 5.5; r — число участков, на которые разбито сооружение; m_k — коэффициент пульсации скоростного напора для середины k-го участка.

Значения коэффициентов m_k для различных типов подстилающей поверхности (А, Б, В) и для открытого моря приведены в табл. 7.

6.5. Коэффициент пространственной корреляции ν допускается принимать по данным табл. 8; он учитывается только для первой формы собственных колебаний. При учете высших форм колебаний $\nu=1$.

Таблица 7

Местность типа	m_k при высоте над поверхностью земли, м						
	до 10	20	40	60	100	200	350 и выше
А	0,6	0,55	0,48	0,46	0,42	0,38	0,35
Б	0,88	0,75	0,65	0,6	0,54	0,46	0,4
В	1,75	1,4	1,1	0,97	0,82	0,65	0,54
Открытое море	0,4	0,37	0,34	0,33	0,32	—	—

Таблица 8

ε_1	ν при высоте сооружения, м						
	30	45	60	120	150	300	450 и выше
0,01	0,7	0,65	0,6	0,55	0,55	0,45	0,4
0,05	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,45	0,4
0,1	0,85	0,8	0,75	0,65	0,6	0,5	0,4
0,2	0,9	0,85	0,85	0,75	0,7	0,6	0,5

6.6. При определении ветровой нагрузки на дымовые трубы, башни, аппараты колонного типа и открытые этажерки допускается учитывать только первую форму собственных колебаний. Необходимость учета высших форм колебаний для высоких сооружений консольного типа устанавливается в каждом случае в зависимости от принятой расчетной схемы и от распределения масс и жесткостей по высоте сооружения.

6.7. Нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки $Q_н^д$, кН, для сооружений с массой и ветровой нагрузкой, приведенными к его вершине (водонапорные башни, транспортерные галереи и т. п.), допускается определять по формуле

$$Q_н^д = Q_н^с \nu \xi_1 m, \tag{11}$$

где $Q_н^с$ — приведенная к вершине статическая составляющая ветровой нагрузки; ξ_1, ν — то же, что в пп. 6.3 и 6.5; m — коэффициент пульсации скоростного напора для верха сооружения, принимаемый по данным табл. 7.

Для транспортерных галерей коэффициент ν определяется по табл. 15.

6.8. Нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки $q_н^д$, Па, для сооружений с равномерно распределенной массой и постоянной по высоте жесткостью при учете только первой формы собственных колебаний допускается определять по формуле

$$q_н^д = q_н^с (H) \varkappa \nu \xi_1 m, \tag{12}$$

где $q_н^с (H)$ — нормативное значение статической составляющей ветровой нагрузки на уровне верха сооружения, определяемой по п. 2.1; ξ_1, ν, m — то же, что и в п. 6.7; $\varkappa$ — коэффициент, учиты-

вающий форму собственных колебаний сооружения (парабола) и характер изменения коэффициента пульсации по высоте и принимаемый по табл. 9 (H — высота сооружения, z — расстояние от поверхности земли до рассматриваемого сечения).

Таблица 9

z/H	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\varkappa$	0,04	0,12	0,23	0,36	0,52	0,69	0,88	1,09	1,32	1,56

6.9. Расчетные динамические перемещения высокого сооружения определяются по формуле

$$y_j^{д} = \left(\sum_{i=1}^{s} \eta_{ij}^2 \, \xi_i^2 \, \nu^2 / \omega_i^4 \right)^{1/2}, \tag{13}$$

где η_{ij}, ξ_i, ν — принимаются по пп. 6.3—6.5; ω_i — i-ая круговая частота собственных колебаний сооружения.

6.10. Усилия и перемещения сооружения при действии ветровой нагрузки должны определяться раздельно от статической составляющей и от динамической составляющей, соответствующей каждой i-й форме колебаний.

Суммарные усилия и перемещения допускается определять по формуле

$$X = X^{с} + \left[\sum_{i=1}^{s} \left(X_i^{д} \right)^2 \right]^{1/2}, \tag{14}$$

где X — изгибающий (крутящий момент), поперечная или продольная сила, перемещение; $X^{с}$ — то же, от статической составляющей ветровой нагрузки; $X_i^{д}$ — то же, от динамической составляющей ветровой нагрузки при колебаниях по i-й форме; s — число учитываемых в расчете форм колебаний.

6.11. При расчете железобетонной дымовой трубы на ветровую нагрузку усилия в ее сечениях и перемещения определяются методом последовательных приближений.

В качестве первого приближения принимаются изгибающие моменты в сечениях трубы, вычисленные без учета нормальных сил.

Расчетные значения статической составляющей ветровой нагрузки для участков трубы определяются по пп. 2.1, 2.2 и 5.5. Динамическое воздействие пульсации скоростного напора учитывается путем умножения статической составляющей на коэффициент, принимаемый равным 1,3 для нижних участков и 1,5 для верхних участков трубы.

Далее для всех участков трубы вычисляются нормальные силы N_j от собственного веса ствола, футеровки, площадок и т. п. По усилиям $M_j^{(1)}$ и N_j вычисляются с учетом образования трещин кривизны и прогибы оси трубы на уровне середины участков [25] *.

*В квадратных скобках дается ссылка на литературу.

Затем вычисляются дополнительные моменты от нормальных сил $M_{доп}^{(1)}$, при этом кроме прогибов $y_i^{(1)}$ учитываются также прогибы $y_{крен.\,i}$, вызванные креном фундамента. Во втором приближении определяются прогибы трубы по суммарным изгибающим моментам первого приближения

$$M_{сумм}^{(1)} = M^{(1)} + M_{доп}^{(1)}$$

и вычисляются новые дополнительные изгибающие моменты $M_{доп}^{(2)}$, суммируемые с моментами $M^{(1)}$. Процесс практически сходится после двух-трех приближений.

При расчете трубы по первому предельному состоянию (по несущей способности) прогибы трубы, вызванные солнечной радиацией, не учитываются.

При расчете по второму предельному состоянию прогиб ствола трубы определяется от суммарного действия нормальных сил, нормативной ветровой нагрузки, крена фундамента и солнечной радиации. Рекомендуется прогиб верха трубы $y_в$ от действия солнечной радиации принимать равным $0{,}005H$, где H — высота трубы.

В качестве первого приближения для упругой линии трубы может быть принята парабола вида

$$y = y_в z^2/H^2.$$

По суммарным изгибающим моментам i-го приближения вычисляются жесткости сечений трубы и ее прогибы. Принимая линию прогибов от расчетной ветровой нагрузки в качестве первого приближения методом последовательных приближений (см. п. 7, прил. 2), определяются основной период и первая форма собственных колебаний трубы.

Динамическая составляющая ветровой нагрузки определяется по пп. 6.2—6.5.

ОТКРЫТЫЕ ЭТАЖЕРКИ И ОДНОЭТАЖНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ЗДАНИЯ

6.12. Для открытых этажерок в качестве расчетной схемы принимается плоская стержневая система (рамная, решетчатая, комбинированная), жесткость которой равна суммарной жесткости плоских систем, составляющих этажерку. Масса M_j, сосредоточенная в узлах j-го яруса системы, равна массе j-го перекрытия, включая в нее массы всего расположенного на перекрытии оборудования, а также полусумму масс стоек j-го и k-го этажа.

Ветровая нагрузка на открытые и полуоткрытые (с закрытыми нижними этажами) этажерки с расположенным на них технологическим оборудованием определяется по пп. 6.2—6.6 для двух направлений ветра, перпендикулярного продольной оси этажерки и совпадающего с ее продольной осью. Коэффициент пространственной корреляции ν принимается по табл. 10.

6.13. Если массы этажей и жесткости стоек отличаются не более чем на 20%, то допускается ветровую нагрузку на этажерку определять по формуле (11), при этом ν принимается по табл. 10, а $\varkappa$ — по табл. 13.

Таблица 10

B/H	ε_1	ν при высоте здания, м				
		30	40	50	90	120
1	0,01 0,05 и более	0,53 0,47	0,49 0,42	0,47 0,4	0,4 0,33	0,36 0,3
2	0,01 0,05 и более	0,47 0,4	0,43 0,36	0,41 0,34	0,33 0,27	0,3 0,24
3	0,01 0,05 и более	0,43 0,36	0,39 0,32	0,37 0,3	0,29 0,24	0,26 0,21

6.14. Ветровая нагрузка на открытую этажерку, примыкающую к зданию, но не связанную с ним, определяется как для отдельно стоящей этажерки.

Для связанной со зданием этажерки, высота которой меньше или равна высоте здания, ветровая нагрузка определяется по п. 6.2, при этом коэффициент динамичности ξ_1 в формуле (9) принимается равным единице, а для вычисления приведенного ускорения собственная форма колебаний может быть принята в виде прямой линии.

Расчетная схема для этажерки, высота которой больше высоты здания, устанавливается в зависимости от высоты и конструктивной схемы здания. Если $H_{эт} \gg H_{здан}$, то ветровая нагрузка определяется так же, как для отдельно стоящей этажерки.

6.15. Для одноэтажных производственных зданий в качестве расчетной схемы может быть принят защемленный в основание консольный стержень с массой покрытия M, сосредоточенной в его вершине (центре тяжести покрытия) и распределенной по высоте здания массой стоек, ограждений, подкрановых балок, мостового крана и площадок, связанных со стойками, μ.

Сосредоточенные на уровне подкранового пути массы подкрановых балок и мостового крана, а также сосредоточенные массы площадок, связанных со стойками зданий, приводятся к эквивалентной массе, распределенной по высоте стойки (см. п. 7, прил. 2).

В этом случае на массу покрытия M действует сосредоточенная динамическая составляющая ветровой нагрузки, определяемая по формуле

$$Q_н^д = \frac{0,45\, M H q_н^с (H)\, \nu \xi_1\, m}{M + \mu H/3}, \qquad (15)$$

а по высоте стержня — распределенная по треугольнику интенсивность динамической составляющей ветровой нагрузки, ордината которой на уровне расположения массы M может быть определена по формуле (15) путем замены в числителе массы M на массу μ.

Здесь $q_н^с(H)$ и m — соответственно нормативное значение статической составляющей ветровой нагрузки и коэффициент пульсации скоростного напора на уровне верха здания, определяемые по п. 2.1 и по табл. 7. Коэффициент ν принимается по табл. 10.

ВЫСОКИЕ ЗДАНИЯ

6.16. Динамическая составляющая ветровой нагрузки определяется для трех типов зданий высотой более 40 м:

1. Прямоугольные и квадратные в плане здания башенного типа с центром жесткости, совпадающим с центром масс. Для такого здания допускается учитывать только первые формы собственных колебаний, соответствующие его поступательным движениям в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

2. Несимметричные в плане здания с центром жесткости, не совпадающим с центром масс. Для такого здания учитываются его три низшие собственные частоты, соответствующие поступательным движениям здания в двух взаимно перпендикулярных направлениях и вращательным колебаниям относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести здания.

3. Симметричные протяженные в плане здания типа пластин. Для такого здания учитываются его поперечные поступательные и вращательные колебания, возникающие вследствие неравномерного распределения давления ветра по наветренным и заветренным граням здания.

6.17. Для зданий первого типа нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки определяется по п. 6.2, коэффициент ν, учитывающий пространственную корреляцию пульсации скорости ветра по высоте и фронту здания, принимается по табл. 11.

Таблица 11

Отношение длины наветренной грани здания B к его высоте H	ε_1	ν при высоте здания, м				
		30	40	50	90	120
0,2	0,01	—	—	0,57	0,51	0,48
	0,05			0,53	0,44	0,4
	0,1			0,59	0,48	0,42
0,5	0,01	0,57	0,54	0,52	0,46	0,42
	0,05	0,53	0,48	0,46	0,38	0,35
	0,1	0,59	0,53	0,5	0,39	0,35

При отношении $B/H < 0{,}2$ учитывается только корреляция пульсации скорости по высоте. В этом случае коэффициент ν принимается по табл. 12.

Для значений $0{,}2 < B/H < 0{,}5$ коэффициенты ν определяются по табл. 11.

Таблица 12

ε_1	ν при высоте здания, м		
	50	90	120
0,05	0,68	0,63	0,6
0,1	0,75	0,7	0,65
0,2	—	—	0,75

Нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки $q_д^п$, Па, для зданий первого типа с равномерно распределенной массой и постоянной по высоте жесткостью допускается определять по формуле (12). Коэффициент $\varkappa$ принимается по табл. 13.

Таблица 13

z/H	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\varkappa$	0,34	0,52	0,66	0,79	0,9	1	1,1	1,19	1,28	1,36

6.18. Для несимметричных зданий (тип 2) расчетное значение перемещения на уровне z в направлении 2 (оси y) определяется по формуле

$$y_р(z) = \frac{Cz}{H}\left(\sum_{i=1}^{3}\sum_{l=1}^{3}\frac{A_i A_l \nu_{li}^2 k_{2l} k_{2l}}{\omega_i^2 \omega_l^2 M_i M_l}\right)^{1/2}. \qquad (16)$$

Здесь $C = 0{,}8165\, HBmq_н^с(H)$,

$$A_i = b_{12} k_{1i} + k_{2i} + k_{3i} e_a,$$

где k_{1i}, k_{2i}, k_{3i} — ординаты составляющих пространственной собственной формы колебаний здания на уровне его верха, соответствующей i-ой собственной частоте; $b_{12} = c_t/c_n$; e_a — аэродинамический эксцентриситет; ν_{li} — коэффициент пространственной корреляции, определяемый по табл. 14.

Обобщенная масса здания $M_i = \frac{H}{3}\,[\mu(k_{1i}^2 + k_{2i}^2) + Jk_{3i}^2]$; масса единицы высоты здания $\mu = (\sum_{k=1}^{r} M_k)/H$; момент инерции массы единицы высоты здания $J = (\sum_{k=1}^{r} J_k)/H$; ω_i^2 — квадрат i-й круговой собственной частоты здания.

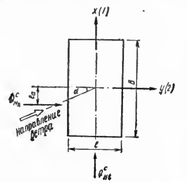


Рис. 7. Направление осей здания и составляющих ветровой нагрузки при неравномерном распределении давления по наветренной грани здания

Примечание. При определении перемещений и усилий в зданиях типа 2 и 3 ось x (1) направлена вдоль наветренной грани, ось y (2) нормальна к ней, а вертикальная ось z (3) проходит через центр тяжести здания (рис. 7).

Таблица 14

μ_{li}	B/H	ε_i	ν_{li} при высоте здания, м				
			30	40	50	90	120
1	0,5	0,01	0,44	0,42	0,41	0,36	0,33
		0,05	0,52	0,48	0,45	0,38	0,34
		0,1	0,66	0,6	0,56	0,44	0,39
	1	0,01	0,41	0,39	0,37	0,31	0,29
		0,05	0,46	0,42	0,4	0,33	0,29
		0,1	0,57	0,51	0,47	0,37	0,33
	2	0,01	0,37	0,34	0,32	0,26	0,24
		0,05	0,4	0,36	0,34	0,27	0,24
		0,1	0,48	0,43	0,39	0,3	0,26
	3	0,01	0,34	0,31	0,29	0,23	0,21
		0,05	0,36	0,33	0,3	0,24	0,21
		0,1	0,42	0,38	0,34	0,26	0,23
0,9	0,5	0,01	0,44	0,42	0,41	0,36	0,33
		0,05	0,48	0,45	0,43	0,37	0,34
		0,1	0,55	0,51	0,48	0,4	0,36
	1	0,01	0,41	0,39	0,37	0,31	0,29
		0,05	0,44	0,41	0,38	0,32	0,29
		0,1	0,49	0,45	0,42	0,34	0,31
	2	0,01	0,37	0,34	0,32	0,26	0,24
		0,05	0,38	0,35	0,33	0,27	0,24
		0,1	0,42	0,39	0,36	0,28	0,25
	3	0,01—0,1	0,36	0,32	0,3	0,24	0,21
0,7—0,8	0,5	0,01—0,1	0,46	0,44	0,42	0,36	0,33
	1	0,01—0,1	0,43	0,41	0,38	0,32	0,29
	2	0,01—0,1	0,38	0,35	0,33	0,27	0,24
	3	0,01—0,1	0,35	0,32	0,29	0,24	0,21

6.19. Нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки (интенсивности инерционной силы), кН/м, на уровне z в направлении 2 определяется по формуле

$$q_{\text{н}}^{\text{д}}(z) = \frac{C\mu z}{H} D_{il2}, \tag{17}$$

где

$$D_{il_2} = \left(\sum_{i=1}^{3} \sum_{l=1}^{3} \frac{A_i A_l k_{2i} k_{2l} \nu_{il}^2}{M_i M_l} \right)^{1/2}. \tag{18}$$

Коэффициенты пространственной корреляции ν_{il} в зависимости от соотношения $\mu_{il} = \varepsilon_l/\varepsilon_i$, ε_i, $\lambda = B/H$ и H приведены в табл. 14.

Нормативное значение возмущающего крутящего момента, кНм/м, приложенного на уровне z

$$M_{\text{н.кр}} = \frac{CJz}{H} D_{il3}. \tag{19}$$

Для D_{il3} следует в D_{il2} заменить индекс 2 на 3.

6.20. В протяженных высоких зданиях типа пластин (тип 3) расчетное перемещение крайней диафрагмы на уровне z в направлении 2

$$y_{\text{кр}}(z) = \frac{3Cz}{\mu H^2 \omega_2^2} \left[\nu_{22}^2 + B e_a \nu_{32}^2 \times \frac{\mu}{J} \left(\frac{\omega_2}{\omega_3} \right)^2 + \frac{B^2}{4} \nu_{33}^2 e_a^2 \left(\frac{\mu}{J} \right)^2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_3} \right)^4 \right]^{1/2}. \tag{20}$$

Нормативное значение интенсивности инерционной силы (динамической составляющей ветровой нагрузки), действующей на крайнюю диафрагму

$$q_{\text{н}}^{\text{д}}(z) = \frac{3Cz}{H^2} \left(\nu_{22}^2 + \frac{2e_a \nu_{32}^2}{B} + \frac{e_a^2 \nu_{33}^2}{B^2} \right)^{1/2}. \tag{21}$$

Если в формулах (20) и (21) принять $e_a = 0$, то получим перемещение $y_{\text{р}}(z)$ и динамическую составляющую ветровой нагрузки

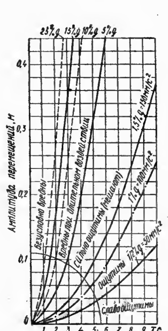


Рис. 8. Характеристики воздействия на людей низкочастотных гармонических колебаний

при равномерном распределении давления ветра по наветренной и заветренной граням здания.

Нормативное значение возмущающего крутящего момента, кНм/м, приложенного на уровне z

$$M_{\text{н.кр}} = \frac{3Ce_a v_{33} z}{H^2}, \qquad (22)$$

6.21. Предельные ускорения колебаний и характеристики их воздействия на людей приведены на графиках рис. 8. Пунктирная линия соответствует ускорению $1\% g = 100$ мм/с², которое рекомендуется в качестве предельно допустимого для высоких зданий.

АНТЕННО-МАЧТОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ

6.22. Расчет антенно-мачтового сооружения на действие ветра вдоль и поперек системы состоит из двух частей: расчет антенного полотна; расчет цепочки мачт.

6.23. Нормативное значение интенсивности нагрузки на горизонтальный элемент полотна и на горизонтальные ванты мачт при ветре, нормальном к плоскости полотна, определяется по формуле

$$q_{\text{н}}(z_1) = q_0\, k_t(z_1)\, c_{x\,\text{прив}}\, d_{\text{в}} \left[1 + m(z_1)\, \nu(L)\right], \qquad (23)$$

где $k_t(z_1)$ — коэффициент, принимаемый по табл. 2; $c_{x\text{прив}} = (\Sigma c_{xi} S_i)/S$ — приведенный коэффициент лобового сопротивления горизонтального элемента; c_{xi} — коэффициент лобового сопротивления i-го участка элемента; S_i — характеристическая площадь участка; $S = Ld_{\text{в}}$ — характеристическая площадь элемента; L — его длина; $d_{\text{в}}$ — диаметр ванты; z_1 — отметка расположения горизонтального элемента; $m(z_1)$ — коэффициент пульсации скоростного напора, принимаемый по табл. 7; $\nu(L)$ — коэффициент пространственной корреляции пульсационной составляющей интенсивности ветровой нагрузки, принимаемый по табл. 15.

Таблица 15

L	40	60	80	100	120	140	160	200	300	400
$\nu(L)$	0,7	0,65	0,61	0,58	0,55	0,53	0,51	0,48	0,42	0,38

6.24. Нормативное значение ветровой нагрузки, Па, распределенной по антенному полотну, при ветре, нормальном плоскости полотна, определяется по формуле

$$q_{\text{н}} = q_{\text{н}}(H)\left[0,757 + m(H)\, \nu_1\right], \qquad (24)$$

где $q_{\text{н}}(H) = q_0(H) c_{x\text{прив}}$ — нормативное давление ветра на уровне H; $c_{x\text{прив}} = (\Sigma c_{xL} F_L + \Sigma c_{xH} F_H)/S$; c_{xL}, c_{xH}, F_L, F_H — соответственно коэффициенты лобового сопротивления и характеристические площади горизонтальных и вертикальных элементов полотна; $S = HL$ — площадь полотна; L — его горизонтальный размер; H — вертикальный; $m(H)$ — коэффициент пульсации скоростного напора на уровне H; ν_1 — коэффициент пространственной корреляции пульсационной составляющей ветровой нагрузки на полотно, определяемый по табл. 16.

Таблица 16

L	ν_1 при высоте здания H, м			
	40	80	120	160
40	0,56	0,52	0,5	0,47
80	0,49	0,46	0,43	0,4
120	0,44	0,42	0,4	0,39
160	0,41	0,39	0,37	0,36

6.25. Нормативное значение интенсивности ветровой нагрузки, кН/м, на вертикальные элементы полотна при действии ветра в плоскости полотна определяется по формуле

$$q_{и} = q_{н}(H)\, d_{в} \left[0{,}757 + \frac{m(H)\, \nu_2}{s}\right], \tag{25}$$

где s — число вертикальных элементов.

Значения коэффициента пространственной корреляции интенсивности ветровой нагрузки ν_2 приведены в табл. 17.

Таблица 17

L	ν_2 при числе вертикальных элементов											
	$s=2$				$s=4$				$s=6$			
	Высота полотна H, м											
	40	80	120	160	40	80	120	160	40	80	120	160
40	1,33	1 23	1,16	1,11	2,6	2,41	2,28	2,17	3,88	3,61	3,4	3,24
80	1,27	1,18	1,12	1,06	2,43	2,27	2,15	2,05	3,61	3,38	3,2	3,05
120	1,23	1,14	1,08	1,03	2,31	2,17	2,05	1,96	3,42	3,21	3,04	2,91
160	1,2	1,12	1,05	1	2,22	2,08	1,97	1,89	3,27	3,07	2,92	2,79

6.26. Нормативное значение интенсивности ветровой нагрузки, кН/м, на вертикальные и горизонтальные элементы определяется по формуле

$$q_{н.инт.} = q_{н}\, d_{в}, \tag{26}$$

где $q_{н}$ принимается по формуле (24). На эти нагрузки рассчитывается контурный леер и для них определяются расчетное тяжение в подвесках рей и нагрузки на мачту.

Реакция полотна, приложенная к верху мачты, суммируется со статической ветровой нагрузкой, приложенной на данном уровне, и в динамическом расчете мачты не учитывается.

6.27. При действии ветра, нормальном к плоскости полотна, рассматривается одна мачта цепочки.

Перемещения и усилия в стволе мачты и натяжение в ее вантах при статическом расчете определяются методами строительной механики с учетом пространственной работы мачты и геометрической нелинейности вант.

Алгоритм статического расчета мачты, построенный на основе метода перемещений, приведен в п. 5, прил. 2.

6.28. Нормативное значение статической составляющей ветровой нагрузки на ствол мачты определяется по п. 2.1.

Нормативное значение суммарной интенсивности статической нагрузки, нормальной к j-ой ванте k-го яруса, определяется по формуле

$$q_{jk}^{c}(z) = \left(\sqrt{g_n^2 + q_n^2(z,\theta) + 2g_n\, q_n(z,\theta)\cos\left[g_n,\, q_n(z,\ \theta)\right]}\right)_{jk}, \qquad (27)$$

где g_n — нормальная составляющая веса, гололеда или эквивалентной нагрузки на единицу длины ванты;

$$q_n(z,\theta) = q_0\, k_t(z)\, dc_x \sin^2\theta; \quad \cos\left[g_n, q_n(z,\theta)\right] = \frac{\sin\alpha\cos\varphi}{\sin\theta},$$

Скоростной напор q_0 и коэффициент $k_t(z)$ принимаются по табл. 1 и 2.

6.29. Для динамического расчета мачт рекомендуются две приближенные расчетные модели: А — линейная пространственная система; Б — упругий стержень на линейно-податливых опорах.

Для мачт с трубчатым и решетчатым стволом, масса которого намного превышает массу вант, допустимо использование модели Б.

Для мачт с решетчатым стволом и с тяжелыми вантами или большим числом вант в ярусе применение модели Б приводит к излишним запасам прочности в сооружении.

Методика определения собственных частот и форм колебаний для указанных моделей приведена в п. 7, прил. 2.

6.30. При расчете модели Б допускается учитывать только ее первую форму собственных колебаний. Масса вант не учитывается.

Динамическая составляющая ветровой нагрузки определяется по указаниям п. 6.2.

Сосредоточенные в узлах мачты горизонтальные реакции вант (при действии на них пульсации скоростного напора) допускается учитывать с коэффициентом пространственной корреляции пульсации скорости, равным: при трех вантах в плане — 0,5; при четырех вантах в плане — 0,4; при шести и более вантах в плане — 0,35.

6.31. Алгоритм расчета моделей А и Б с учетом взаимной корреляции между формами и пространственной корреляции продольной компоненты пульсации скорости ветра приведен в п. 5, прил. 2.

Число собственных форм колебаний, учитываемых при определении динамических усилий и перемещений, зависит для модели А от жесткости ствола и от соотношения масс ствола и вант и устанавливается в каждом случае при реализации алгоритма расчета на ЭВМ, для модели Б может быть принято не более пяти.

6.32. Расчетные усилия в сечениях ствола мачты равны сумме динамических усилий и абсолютных значений усилий при действии статической составляющей ветровой нагрузки.

Расчетные натяжения в вантах для модели Б определяются на основе статического расчета мачты как нелинейной системы при действии на нее статической и динамической составляющих ветровой нагрузки.

6.33. В качестве расчетной схемы для цепочки мачт принимается система упругих стержней, связанных между собой горизонталь-

ными вантами. Указания по динамическому расчету такой системы приведены в п. 5, прил. 2.

6.34. Ветровую нагрузку на систему от вант рекомендуется определять в предположении статического действия пульсации скоростного напора на ванты.

6.35. Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки на систему от вант определяется по формуле

$$R' = q_н (H_1)\, m\, (H_1)\, \nu_c, \qquad (28)$$

где $q_н(H_1)$ — нормативное значение интенсивности пульсационной составляющей ветровой нагрузки на ванту на уровне первого яруса мачты; $m(H_1)$ — коэффициент пульсации скоростного напора на том же уровне; ν_c — коэффициент пространственной корреляции пульсационной составляющей ветровой нагрузки на систему. Формула для определения ν_c приведена в п. 5, прил. 2.

Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки, действующей в каждом узле вант

$$R'_{н.вант} = R'_н / km,$$

где k — число мачт цепочки; m — число ярусов мачты.

Эта нагрузка суммируется со статической составляющей ветровой нагрузки, действующей на узел вант мачты.

ГРАДИРНИ

6.36. Статическая составляющая ветровой нагрузки на оболочку градирни определяется по п. 2.1.

Коэффициенты давления и коэффициенты разложения в ряд Фурье ветровой нагрузки, распределенной по поверхности оболочки, принимаются по пп. 12 и 14, табл. 1, прил. 1.

6.37. Перемещения и усилия в оболочке градирни при действии статической составляющей ветровой нагрузки определяются методами теории тонких оболочек.

Алгоритм динамического расчета градирен на действие ветра приведен в п. 5, прил. 2.

7. АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВЫСОКИХ СООРУЖЕНИЙ И ГИБКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Различают два явления аэродинамической неустойчивости высоких сооружений, возникающих при их взаимодействии с потоком ветра: вихревое возбуждение сооружений цилиндрической формы и галопирование гибких призматических конструкций.

ВИХРЕВОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ СООРУЖЕНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

7.1. При обтекании сооружений цилиндрической формы плоскопараллельным потоком ветра в области за сооружением образуется вихревая дорожка с шахматным расположением вихрей. Когда при определенных скоростях ветра частота срыва вихрей совпадает

с собственной частотой сооружения, возникают резонансные колебания.

Поэтому кроме динамического расчета такого сооружения на действие турбулентного ветра необходим также расчет на резонанс.

7.2. Проверка на резонанс сооружений круговой цилиндрической формы должна производиться в тех случаях, когда критическая скорость ветра $v_{\text{кр}.i}$ находится в пределах $0{,}64\sqrt{q_0} \leqslant v_{\text{кр}.i} \leqslant 25$ м/с.

При $v_{\text{кр}.i} < 0{,}64\sqrt{q_0}$ усилия в сооружении при резонансе всегда меньше усилий при расчете в направлении действия ветра; скорость 25 м/с принята в качестве верхней границы критической скорости для всех географических районов СССР.

7.3. Критическую скорость ветра, вызывающую резонансные колебания сооружения в направлении, перпендикулярном ветровому потоку, допускается определять по формуле

$$v_{\text{кр}\,i} = \frac{d}{T_i\,\text{Sh}}, \tag{29}$$

где T_i — период собственных колебаний сооружения по i-ой форме, с; Sh — число Струхаля поперечного сечения (для круга Sh=0,2, для сечения с угловыми точками Sh=0,15); d — диаметр сооружения, м, для сооружений с малой коничностью (с уклоном не более 0,01) — диаметр его сечения на уровне 2/3 высоты.

7.4. При проверке на резонанс амплитуду интенсивности динамической силы $F_i(z)$, Н/м, на уровне z при колебаниях сооружения по i-ой форме допускается определять по формуле

$$F_i(z) = F_{0i}\,\alpha_i(z), \tag{30}$$

где $\alpha_i(z)$ — относительная ордината i-ой формы собственных колебаний; $F_{0i} = c_y q_{\text{кр}i} d$ — амплитуда интенсивности на уровне свободного конца сооружения консольного типа или в середине пролета трубчатой мачты на вантах; $q_{\text{кр}i} = 0{,}613 v_{\text{кр}i}^2$ — скоростной напор, Па, соответствующий критической скорости $v_{\text{кр}i}$; c_y — коэффициент поперечной силы, принимаемый равным 0,25 — для сооружений круговой цилиндрической формы и 0,5 — для цилиндрических сооружений с поперечными сечениями, имеющими угловые точки.

Для сооружения консольного типа допускается учитывать только первую форму собственных колебаний.

7.5. Резонансные усилия и перемещения сооружения в сечении с координатой z допускается определять по формуле

$$X^{\text{рез}}(z) = \frac{\pi}{\delta} X^{\text{c}}(z), \tag{31}$$

где $X^{\text{c}}(z)$ — прогиб, изгибающий момент или поперечная сила от статически приложенной нагрузки $F_i(z)$; для мачт на вантах в качестве расчетного значения $F_i(z)$ принимается наибольшее из значений, вычисленных для критических скоростей $v_{\text{кр}i}$, при этом число учитываемых форм колебаний принимается не более четырех; δ — логарифмический декремент колебаний, принимаемый равным: а) 0,30 — для железобетонных и каменных сооружений; б) 0,15 — для стальных аппаратов на железобетонных постаментах; в) 0,10 — для мачт и стальных футерованных дымовых труб; г) 0,05 — для стальных сооружений и конструкций.

7.6. Расчетную статическую составляющую ветровой нагрузки по направлению действия ветра $q_{кр}^{с}$, Па, соответствующую критическому скоростному напору $q_{кр.i}$, допускается принимать постоянной по высоте сооружения и равной

$$q_{кр}^{с} = q_{кр.i}\, c_x, \qquad (32)$$

где c_x—коэффициент лобового сопротивления, принимаемый по п. 13, табл. 1, прил. 1.

Динамическая составляющая ветровой нагрузки $q_{кр}^{д}$, соответствующая $q_{кр.i}$, определяется в соответствии с указаниями, приведенными в пп. 6.2—6.5, при этом коэффициент динамичности для сооружений, указанных в подпунктах «б» и «в» п. 7.5, принимается по графику *2* рис. 6.

7.7. При расчете на резонанс другие кратковременные нагрузки не учитываются.

7.8. Расчетные усилия и перемещения сооружения при резонансе допускается определять по формуле

$$X(z) = \sqrt{[X^{рез}(z)]^2 + [X^{с}(z) + X^{д}(z)]^2}, \qquad (33)$$

где $X^{рез}(z)$ — перемещение, изгибающий момент или поперечная сила, определяемая по формуле (31); $X^{с}(z)$, $X^{д}(z)$ — то же, от нагрузок $q_{кр}^{с}$ и $q_{кр}^{д}$, определяемых по п. 7.6.

7.9. Для сечений конической железобетонной дымовой трубы, расположенных ниже $^2/_3$ ее высоты, расчетными будут усилия, возникающие в направлении действия ветра. Для верхней части трубы расчетными могут стать усилия при вихревом возбуждении, соответствующие второй форме собственных колебаний.

Критическая скорость ветра определяется для сечения трубы диаметром d, для которого величина $\alpha_2(z_{кр})d^4$ максимальна. Здесь $\alpha_2(z_{кр})$ — ордината 2-й собственной формы колебаний трубы, $z_{кр}$ — высота, для которой определяется критическая скорость

$$v_{кр} = \frac{d}{T_2\, \mathrm{Sh}}, \qquad (34)$$

где T_2 — период, соответствующий 2-й собственной форме колебаний; $\mathrm{Sh} = 0{,}22$ — число Струхаля.

7.10. Расчетные перемещения и усилия в сечениях трубы определяются по формулам:

$$X_р(z) = \alpha_X(z)\, p_р, \qquad (35)$$

где $\alpha_X(z)$ — коэффициенты распределения амплитуд перемещений, изгибающих моментов и поперечных сил; расчетное значение обобщенной координаты, соответствующей 2-й собственной форме колебаний

$$p_р = \sqrt{\frac{\pi L}{\gamma\beta}} \left(\frac{c_y\, \rho d^4\, \alpha_2(z_{кр})}{8\pi^2\, \mathrm{Sh}^2 M_2}\right) = 0{,}518\, \frac{\rho d^4\, \alpha_2(z_{кр})}{\sqrt{\beta}\, M_2}, \qquad (36)$$

где обобщенная масса $M_2 = \int_0^H \mu(z)\,\alpha_2^2(z)\,dz$; $L = 2$ — масштаб тур-

Таблица 18

Схема аппарата	Соотношения между		Расчетный диаметр d	Расчетная высота h
	h_1 и h_2	d_1 и d_2		
	$h_1 \gg h_2$	Любое	d_1	h_1+h_2
	$h_2 \gg h_1$	»	d_2	h_1+h_2
	$h_1 \approx h_2$	$d_1<d_2$	d_1	h_1+h_2
			d_2	h_2
	$h_1+h_3>h_2$	Любое	d_1	$h_1+h_2+h_3$
	$h_1+h_3 \approx h_2$	$d_1<d_2$	d_1	$h_1+h_2+h_3$
			d_2	h_1+h_2

булентности (в диаметрах трубы); $\gamma=\dfrac{\delta}{\pi}=0{,}1$; $\beta=\alpha_A z_{\text{кр}}/d+t$; $\alpha_A=0{,}16$; t — наклон образующей трубы к вертикальной оси; $\rho=1{,}29\cdot 10^{-3}$ т/м^3 — плотность воздуха; $c_y=0{,}25$ — коэффициент поперечной силы.

7.11. Для аппаратов колонного типа переменного сечения расчетный диаметр и высота принимаются по табл. 18.

7.12. Групповые аппараты, связанные между собой в горизонтальном направлении, и аппараты, примыкающие к зданию или открытой этажерке и имеющие с ними одинаковую высоту, на резонанс не проверяются.

Если аппараты выше здания или открытой этажерки, то при проверке на резонанс аэродинамические силы следует принимать действующими только до отметки верха здания или этажерки.

ГАЛОПИРОВАНИЕ ГИБКИХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

7.13. Интенсивность аэродинамической силы $F(z)$, вызывающей поперечные колебания призматической конструкции типа галопирования, определяется ее лобовым сопротивлением и поперечной си-

лой (рис. 9). Составляющая интенсивности силы $F(z)$ в направлении движения

$$F_y(z) = \frac{1}{2} c_{F_y} \rho b v_{\text{отн}}^2 (z), \qquad (37)$$

где

$$v_{\text{отн}} = v \sec \alpha; \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{\dot{y}}{v},$$

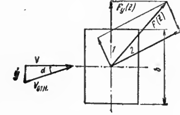


Рис. 9. Составляющие аэродинамической силы

1 — поперечная сила; *2* — лобовое сопротивление; *F (z)* — составляющая в направлении движения

v и $v_{\text{отн}}$ — скорость и относительная скорость ветра; $\dot{y}$ — скорость поперечных колебаний конструкции; b — ширина ее наветренной грани; ρ — плотность воздуха; коэффициент

$$c_{F_y} = -\left(c_y + c_x \operatorname{tg} \alpha\right) \sec \alpha. \qquad (38)$$

Здесь c_x и c_y — коэффициенты лобового сопротивления и поперечной силы конструкции.

7.14. Зависимость коэффициента поперечной силы от угла атаки допускается приближенно аппроксимировать степенным рядом вида

$$c_{F_y} = \sum_{i=1}^{m} A_i \left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^i, \qquad (39)$$

где A_i — i-ый коэффициент разложения. Число учитываемых членов ряда зависит от формы поперечного сечения конструкции. Для призмы квадратного сечения $i = 1, 3, 5, 7$. Если функция c_{F_y} асимметрична, то используются и четные показатели степени.

7.15. Для квазистационарной модели явления галопирования (приведенная скорость ветра $v_r = \dfrac{v}{\omega_1 b} > 10$) критическая скорость ветра, соответствующая началу колебаний, определяется по формуле

$$v_{\text{крит}} = \frac{2\gamma_k \omega_1 \mu}{\rho b A_1 c_1}, \qquad (40)$$

где $\gamma_k = \delta/\pi$ — коэффициент диссипации энергии колебаний конструкции; ω_1 — ее первая собственная круговая частота; μ — масса единицы длины конструкции

$A_1 = \left(\frac{dc_{F_y}}{d\alpha}\right)_{\alpha \to 0}$ — первый коэффициент разложения c_{F_y} в степенной ряд

$$c_1 = \frac{\int\limits_0^H k_1(z)\, \alpha_1(z)^2\, dz}{\int\limits_0^H \alpha_1(z)\, dz}, \tag{41}$$

где $k_1(z) = \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha_t}$ — коэффициент, учитывающий изменение средней скорости по высоте конструкции; $\alpha_1(z)$ — ее первая собственная форма колебаний.

Значения коэффициента c_1 для четырех собственных форм колебаний конструкций и двух значений показателя степени α_t приведены в табл. 13, п. 6, прил. 2.

Расчет конструкций, для которых квазистационарная модель не может быть использована, должен проводиться на основе данных испытаний моделей в аэродинамической трубе.

7.16. Если критическая скорость ветра больше, чем скорость в данном географическом районе с вероятностью превышения один раз в пять лет, то расчет конструкции на аэродинамические силы, возникающие при галопировании, может не производиться.

7.17. Стационарные амплитуды для одночастотного режима колебаний конструкции, обтекаемой установившимся потоком, определяются известными методами решения нелинейных задач динамики.

Для прямоугольных призм безразмерные стационарные амплитуды колебаний $\bar{a} = a/b$ определяются из алгебраического уравнения

$$\frac{35}{64} A_7 c_7 v_r^{-6} \bar{a}^{-6} - \frac{5}{8} A_5 c_7 v_r^{-4} \bar{a}^{-4} + \frac{3}{4} A_3 v_r^{-2} \bar{a}^{-2} + \frac{\gamma_k}{2n_\mu v_r} - A_1 c_1 = 0, \tag{42}$$

где параметр массы $n_\mu = \rho b^2/4\mu$, коэффициенты $A_i c_i$ для некоторых собственных форм колебаний квадратных призм принимаются по табл. 14, п. 6, прил. 2.

8. БОЛЬШЕРАЗМЕРНЫЕ СТЕКЛА ВИТРИН

8.1. Нормативное значение статической составляющей ветровой нагрузки, действующей на витрину, определяется по п. 2.1. Коэффициент $k_t(z)$ принимается по табл. 3 для местности типа Б. Аэродинамический коэффициент c принимается равным 1. При расчете элементов витрин, примыкающих к углам здания, следует учитывать местное отрицательное давление с коэффициентом $c = -2$, распределенное на ширине 1,5 м.

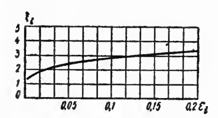


Рис. 10. Коэффициент динамичности

Таблица 19

Высота над поверхностью земли, м	До 10	30	60	100
Коэффициент m	0,7	0,56	0,48	0,43

8.2. Расчетное значение ветровой нагрузки на витрину с учетом динамического действия пульсаций скоростного напора определяется по формуле

$$q_\text{р} = q_\text{н}^\text{с} (1 + \xi m), \tag{43}$$

где m — коэффициент пульсации скоростного напора для середины стекла, принимаемый по табл. 19; ξ — коэффициент динамичности, принимаемый по графику на рис. 7 в зависимости от безразмерного параметра $\varepsilon_1 = \dfrac{T_1 v}{1200}$; $v = 1{,}28 \sqrt{q_0}$; T_1 — период основного тона собственных колебаний стеклянной пластины.

Примечание. Период T_1 допускается определять по формуле

$$T_1 = 2 \sqrt{\frac{12p\,(1+\nu^2)}{gEh^3 \left[\pi^2 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}\right) + \frac{6\gamma\,(1-\gamma^2)}{Ebh^2}\right]}}, \tag{44}$$

где a и b — размеры длинной и короткой (соответственно) сторон стекла; p — вес 1 м² стекла, кН/м²; h — толщина стекла, м; $\gamma = 25$ кН/м³ — его объемный вес; $E = 6{,}5 \cdot 10^4$ МПа — модуль упругости; $\nu = 0{,}25$ — коэффициент Пуассона; g — ускорение силы тяжести.

8.3. Расчет стекла на действие расчетной ветровой нагрузки производится с учетом мембранных напряжений в пластине в предположении, что ее кромки шарнирно закреплены в неподвижной раме относительно поперечных смещений и могут свободно перемещаться в плоскости пластины.

8.4. Прогиб середины пластины w_0 определяется по формуле

$$\frac{0{,}1065 \cdot 10^{-3}\,\pi^{10}}{\lambda^4 + 0{,}6045\lambda^2 + 1}\,\zeta^3 + \frac{\pi^4}{192\,(1-\nu^2)} \left[\pi^2 \left(\frac{1}{\lambda^2} + 1\right)^2 + \chi\right] \zeta = \bar{P}, \tag{45}$$

где $\zeta = w_0/h$; $\lambda = a/b$; $\bar{P} = \dfrac{q_\text{р}}{E} \left(\dfrac{b}{h}\right)^4$; $\chi = \dfrac{N}{D}\, b^2$, N —

сжимающая сила в срединной плоскости от собственного веса стекла, D — цилиндрическая жесткость пластины; $q_{\text{р}}$ — расчетная ветровая нагрузка, определяемая по п. 8.2.

8.5. Расчетные напряжения в пластине определяются суммированием максимальных изгибных и мембранных напряжений одного направления

$$\sigma_{\text{сумм}} = \sigma_{\text{и}}^{\max} + \sigma_{\text{м}}^{\max} \leqslant R^{\text{р}}, \tag{46}$$

где $R^{\text{р}}$ — расчетное сопротивление стекла при растяжении.

Максимальные напряжения в направлении длинной стороны пластины определяются по формулам:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{E\pi^2 h w_0}{2(1-\nu^2)\, b^2}\left(\frac{1}{\lambda^2} + \nu\right); \qquad \sigma_{\text{м}} = \pi^4 E \frac{w_0^2}{b^2}\, \frac{0{,}0282\lambda^2}{\lambda^4 + 0{,}6045\lambda^2 + 1}, \tag{47}$$

а в направлении короткой стороны — по формулам:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{E\pi^2 h w_0}{2(1-\nu^2)\, b^2}\left(1 + \frac{\nu}{\lambda^2}\right); \qquad \sigma_{\text{м}} = \pi^4 E \frac{w_0^2}{a^2}\, \frac{0{,}0282\lambda^2}{\lambda^4 + 0{,}6045\lambda^2 + 1}. \tag{48}$$

8.6. Предельные значения скоростного напора ветра, Па, для различных типоразмеров витринных стекол, расположенных на высоте до 10 м, приведены в табл. 20. Они вычислены для расчетного сопротивления стекла при растяжении $R_{\text{р}} = 10$ МПа.

Таблица 20

Размеры стекла, м	Значения скоростного напора ветра, Па, при толщине стекла, мм											
	10	9,5	9	8,5	8	7,5	7	6,5	6	5,5	5	4,5
4,5×3,5	263	250	238	226	215	205	195	—	—	—	—	—
4×3	299	230	262	246	231	216	203	190	—	—	—	—
3,5×3	328	308	290	274	259	245	232	220	—	—	—	—
3,5×2,5	400	371	343	318	294	273	253	235	219	—	—	—
3,5×2	563	512	465	421	380	343	309	278	251	—	—	—
3×3	—	323	303	287	271	257	244	232	222	—	—	—
3×2,5	—	—	362	336	312	290	270	253	236	222	—	—
3×2	—	—	—	437	397	360	326	295	268	243	—	—
2,5×2,5	—	—	—	—	331	307	286	268	251	237	—	—
2,5×2	—	—	—	—	—	382	348	316	289	265	243	—
2,2×2	—	—	—	—	—	—	363	331	302	277	255	—
2×2	—	—	—	—	—	—	—	341	311	285	262	243

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Аэродинамические коэффициенты для зданий, сооружений и конструкций

Таблица 1

Схемы ветровой нагрузки и указания по определению аэродинамических коэффициентов

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов

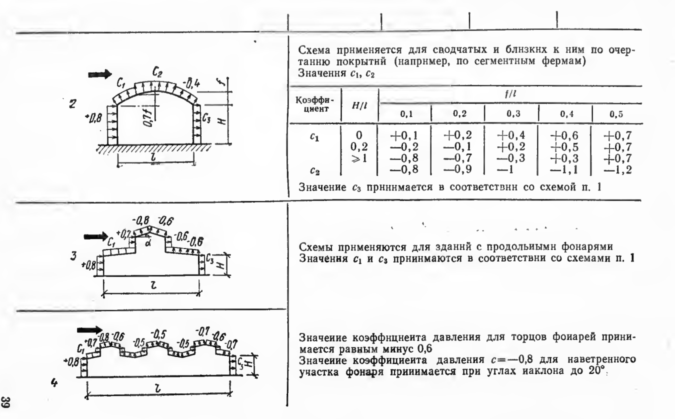
Схемы применяются для двускатных покрытий

Значения c_1, c_2

Коэффициент	$\alpha°$	H/l			
		0	0,5	1	≥2
c_1	0	0	—0,6	—0,7	—0,8
	20	+0,2	—0,4	—0,7	—0,8
	40	+0,4	+0,3	—0,2	—0,4
	60	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8
c_2		—0,4	—0,4	—0,5	—0,8

Значения c_3

B/l	H/l		
	≤0,5	1	≥2
≤1	—0,4	—0,5	—0,6
≥2	—0,5	—0,6	—0,6



2 Схема применяется для сводчатых и близких к ним по очертанию покрытий (например, по сегментным фермам)

Значения c_1, c_2

Коэффициент	H/l	f/l 0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
c_1	0	+0,1	+0,2	+0,4	+0,6	+0,7
	0,2	−0,2	−0,1	+0,2	+0,5	+0,7
	⩾1	−0,8	−0,7	−0,3	+0,3	+0,7
c_2		−0,8	−0,9	−1	−1,1	−1,2

Значение c_3 принимается в соответствии со схемой п. 1

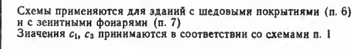
3 Схемы применяются для зданий с продольными фонарями

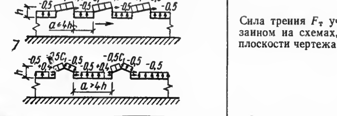
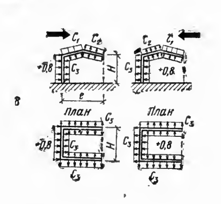
Значения c_1 и c_3 принимаются в соответствии со схемами п. 1

4 Значение коэффициента давления для торцов фонарей принимается равным минус 0,6

Значение коэффициента давления $c = -0,8$ для наветренного участка фонаря принимается при углах наклона до 20°

Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов
5 	Примечание. При расчете поперечных рам зданий с фонарем в соответствии со схемой п. 3 и ветробойными щитами значение суммарного аэродинамического коэффициента на систему «фонарь — щиты» принимается равным 1,4.
6	Схемы применяются для зданий с шедовыми покрытиями (п. 6) и с зенитными фонарями (п. 7) Значения c_1, c_3 принимаются в соответствии со схемами п. 1

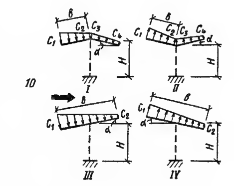
7		Сила трения $F_т$ учитывается как при направлении ветра, указанном на схемах, так и при направлении, перпендикулярном плоскости чертежа
8		Схемы применяются для зданий, постоянно открытых с какой-либо одной стороны: полностью (при отсутствии стены на этой стороне); частично (при наличии постоянно открытых проемов площадью не менее 30% площади стены) Значения c_1, c_2 и c_3 принимаются по схеме п. 1

Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов
	Схемы применяются для уступов зданий Для горизонтальных и наклонных участков ($\alpha < 15°$) покрытия значения коэффициентов давления на длине h_1 и h_2 принимаются такими же, как и на вертикальные участки. При $l_1 > h_1$ длина переходного участка к отрицательному давлению принимается равной $h_1/2$. Значения коэффициентов давления на стороне входящего угла здания (на длине a), параллельной ветровому потоку, принимаются такими же, как и на наветренную сторону При $b > a$ длина переходного участка принимается равной $a/2$
	Схемы применяются для навесов

№ схемы	$\alpha°$	c_1	c_2	c_3	c_4
I	10	0,5	—1,3	—1,1	0
	20	1,1	0	0	—0,4

10



	30	2,1	0,9	0,6	0
II	10	0	—1,1	—1,5	0
	20	1,5	0,5	0	0
	30	2	0,8	0,4	0,4
III	10	1,4	0,4		
	20	1,8	0,5		
	30	2,2	0,6		
IV	10	1,3	0,2		
	20	1,4	0,3		
	30	1,6	0,4		

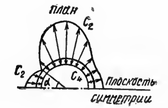
Значення коэффнцнентов c_1, c_2, c_3, c_4 относятся к сумме давленнй на верхнюю и нижнюю поверхностн навесов. Для отрнцательных значений c_1, c_2, c_3, c_4 направление давления на схемах изменяется на протнвоположное

Для волннстых покрытий прн направленин ветра вдоль навеса необходнмо учесть снлу трения $F_т=0{,}04n_пq_0S$, где S — площадь горнзонтальной проекцни покрытия

Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов
11 а) $\mu\leq5$; $c_в=\pm0{,}2$; $\mu\leq5$; $\mu\leq5$; $\mu\leq5$ б) $\mu\leq5$; $-0{,}3$; $+0{,}8$; $+0{,}8$; $\mu\leq5$; $\mu>30$; $-0{,}3$; $+0{,}8$; $\mu\leq5$ в) $\mu\leq5$; c_3; $+0{,}3$; $\mu>30$; c_3; $\mu\leq5$; c_3; $+0{,}3$; $\mu\leq5$ г) $\mu>30$; $+0{,}3$; $+0{,}3$; c_3; $\mu\leq5$; $\mu\leq5$; c_3; c_3; $\mu\leq5$ д) $\mu\leq5$; $c_в=\pm0{,}3$; $\mu>30$; $\mu>30$; $\mu\leq5$ е) $\mu>30$; $c_в=\pm0{,}3$ или $c_в=-0{,}5$; $\mu\leq5$; $\mu\leq5$; $\mu>30$	Схемы применяются для определения внутреннего давления в зданиях закрытых и постоянно открытых полностью или частично с одной и двух сторон Значения c_3 принимается в соответствии со схемой п. 1

12



Схемы применяются для сфер (а) и для сооружений с круговой цилиндрической боковой поверхностью (резервуары, градирии, башии, дымовые трубы) с покрытиями или без покрытий (б)

Схемы используются при расчете оболочки сооружения, а также во всех случаях, когда существенное значение имеет учет местного воздействия ветра

Значения c_1

α°	0	15	30	45	60	75
c_1	+1	+0,9	+0,5	−0,1	−0,7	−1,1

Продолжение

α°	90	105	120	135	150	165	180
c_1	−1,2	−1	−0,6	−0,2	+0,1	+0,3	+0,4

Значения c_2

H/d	α°						
	0	15	30	45	60	75	90
1/6	+0,8	+0,7	+0,4	0	−0,4	−0,6	−0,7
1/3	+0,9	+0,7	+0,4	−0,1	−0,6	−0,9	−1
1	+1	+0,8	+0,1	−0,7	−1,2	−1,5	−1,7
7	+1	+0,8	+0,1	−0,8	−1,7	−2,2	−2,2
⩾25	+1	+0,8	+0,1	−0,9	−1,9	−2,5	−2,6

Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов

H/d	$\alpha°$					
	105	120	135	150	165	180
1/6	—0,5	—0,5	—0,4	—0,3	—0,2	—0,1
1/3	—0,9	—0,6	—0,5	—0,4	—0,3	—0,3
1	—1,2	—0,7	—0,5	—0,4	—0,4	—0,4
7	—1,7	—0,8	—0,6	—0,5	—0,5	—0,5
⩾25	—1,9	—0,9	—0,7	—0,6	—0,6	—0,6

Данные для c_1, c_2 применимы при $Re > 4 \cdot 10^5$

Значения c_3

Покрытие	H/d		
	1/6	1/3	⩾1
Плоское и коническое при $\beta \leqslant 5°$	—0,5	—0,6	—1
Сферическое $f/d \leqslant 1/10$	—0,5	—0,6	—1
» $f/d = 1/4$	—0,4	—0,5	—0,8

Коэффициент c_4 учитывается при отсутствии покрытия или при опущенном покрытии («плавающая кровля»)

H/d	1/6	1/3	⩾1
c_4	—0,5	—0,6	—0,8

Примечание. $Re=\frac{1,28\,d\sqrt{n_п q}}{\nu}$ — число Рейнольдса, где

d — диаметр сооружения, м;
$n_п$ — коэффициент перегрузки, принимаемый по п. 2.2;
q — учитываемый в расчете скоростной напор, Па;
ν — кинематическая вязкость воздуха (при $t=+15°$ С и атмосферном давлении 760 мм рт. ст.
$\nu=0,145\cdot10^{-4}$ м²/с)

13

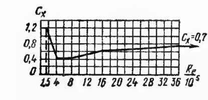
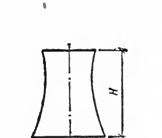


Схема применяется для сооружений с круговой цилиндрической боковой поверхностью (резервуары, градирни, башни, дымовые трубы), а также для круглых трубчатых и сплошных элементов в сквозных сооружениях, проводов, тросов.
При умеренно шероховатой поверхности (бетон, металл, дерево и т. п.) значение коэффициента c_x определяется по приведенному графику. При большей шероховатости значения коэффициентов c_x при $Re\geqslant4\cdot10^5$ определяются по таблице

Сечение	H/d		
	25	7	1
Круг с $\delta=0,02\,d$	0,9	0,8	0,7
» » $\delta=0,08\,d$	1,2	1	0,8

В линиях электропередачи значения коэффициентов c_x допускается принимать:
1,1 — для проводов и тросов $d\geqslant20$ мм, свободных от гололеда;
1,2 — для проводов и тросов $d<20$ мм, свободных от гололеда, и для проводов и тросов любого диаметра, покрытых гололедом

Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов
14 	Схема применяется для градирен, имеющих форму гиперболоида вращения Коэффициенты давления для шероховатых оболочек

$\alpha°$	0	15	30	45	60	75	90	105	120—180
c	1	0,8	0,2	—0,5	—1,2	—1,3	—0,9	—0,4	—0,4

значение углов φ_i
$\varphi_0=36°$, $\varphi_1=72°$, $\varphi_2=100°$
Коэффициенты разложения эпюры давления ветра

Поверхность градирни	Номера гармоник			
	0	1	2	3
Умеренно шероховатая поверхность	—0,600	0,298	0,918	0,397
Шероховатая поверхность	—0,392	0,260	0,602	0,505

Продолжение

Поверхность градирни	Номера гармоник			
	4	5	6	7
Умеренно шероховатая поверхность	—0,059	0,0131	0,061	—0,018
Шероховатая поверхность	0,106	—0,095	—0,019	0,047

15



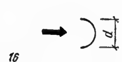


Схема применяется для эллиптического цилиндра с продольной осью, перпендикулярной потоку. При $\frac{H}{a} > 25$ и $Re < 1{,}5 \times 10^5$ (докритическая область)
Коэффициент c_x определяется по таблице

a/b	8	4	2	1	0,5	$\leqslant 0{,}01$
c_x	0,26	0,35	0,6	1,2	1,6	2

При $Re > 1{,}5 \cdot 10^5$ (закритическая область)
Коэффициент c_x определяется по формуле
$c_{x\ эллипс} = \varkappa c_{x\ цилиндра}$,
где $\varkappa$ — определяется по графику;
$c_{x\ цилиндра}$ — по графику, приведенному в п. 13
Диаметр эквивалентного кругового цилиндра принимается равным a, число Рейнольдса $Re = a^2V/b\nu$

16

Схемы применяются для гладких цилиндрических панелей кругового поперечного сечения:
а) установленных на поверхности земли
для $0{,}5 \cdot 10^6 < Re < 10^6$

$\lambda = 2\,H/d$		
>50	14	2
2,3 1,2 1,15	1,95 1 1	1,6 0,8 0,8

Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов
	б) расположенных на высоте $a>H$ от поверхности земли (H — высота панели)
17	Схемы применяются для гладких цилиндрических панелей эллиптического поперечного сечения Коэффициенты c_x

б) $\lambda = H/d$

>50	14	2
2,15	1,85	1,6
1,1	0,9	0,8
1,1	0,9	0,8

17 — Коэффициенты c_x

$a:b$	λ		
	>50	14	2
∞	2	1,3	1,2
8:1	2,1	1,4	1,3
4:1	2,2	1,45	1,35
2:1 1:1	2,3	1,5	1,4

$a:b$	λ		
	>50	14	2
∞	2	1,3	1,2

8:1	1,6	1,1	1
4:1	1,4	0,95	0,8
2:1	} 1,2	0,8	
1:1			0,6

18

а) б)

Схемы применяются для вертикальных гладких цилиндрических панелей кругового поперечного сечения:
а) со свободными горизонтальными краями;
б) расположенных между двумя стенами

Коэффициенты c_n

α°	l:b							
	При свободных горизонтальных краях панели							(между двумя стенами)
	1:20	1:10	1:3	1:1	3:1	10:1	20:1	>1:3
0—10	1,6	1,5	1,3	1,35	1,3	1,4	1,55	1,9
10—20	1,6	1,6	1,35	1,4	1,35	1,35	1,5	1,9
36—39	1,2	1,3	2	1,4	1,1	1,3	1,45	1,75
48—50	0,95	1	1,7	1,8	1,1	1,25	1,7	2,05
52—54	0,9	0,9	1,6	1,7	1,1	1,2	2,1	2,4
68—70	0,6	0,45	1,05	1,2	1,35	1,4	1,6	1,7

Коэффициент c_t

При $\alpha=0—35°$ $c_t=\pm 0{,}1\ c_n$; $e=0{,}1\ b$ ($\alpha=35°$)
При $\alpha=35—90°$ $c_t=\pm 0{,}25\ c_n$; $e=0{,}2\ b$ ($\alpha=70°$)

Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов
19 а) c_x б) d_1 d_2 d_3 d_{n-1} d_n a_1 a_2 $a_3 \ldots a_{n-2}$ a_{n-1}	Схемы применяются для технологического оборудования колонного типа:

а) при направлении ветра, нормальном к торцу цилиндра, $c_x=1$;
б) при направлении ветра вдоль ряда аппаратов.

Коэффициент лобового сопротивления c_x для первого цилиндра принимается по п. 13, для второго и последующих — по формуле $c_{x1}=c_x\eta_1$.

Коэффициент η_1 определяется по таблице

$\frac{d_{n-1}}{d_n}$	a_{n-1}/d_{n-1}			
	1,2	2	4	>6
⩽0,5	—	1	1	1
0,75	—	0,8	0,95	1
⩾10	0,5	0,7	0,9	1

Для случая когда $d_{n-1}<d_n\leqslant d_{n-2}$, η_1 для n-го цилиндра принимается как меньшее значение из двух, вычисленных в зависимости от $\frac{a_{n-1}}{d_{n-1}}$ и $\frac{a_{n-2}+a_{n-1}}{d_{n-2}}$

Для промежуточных значений d_{n-1}/d_n и $\frac{a_{n-1}}{d_{n-1}}$ η_1 определяется линейной интерполяцией

в)

г)

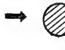
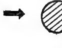
в) При направлении ветра, перпендикулярном ряду аппаратов, коэффициент лобового сопротивления для каждого из цилиндров $c_{x2}=c_x\eta_2$, где c_x — принимается по п. 13 и η_2 определяется по таблице

$a/d_{ср}$	1,2	2	$\geqslant 4$
η_2	1,2	1,1	1

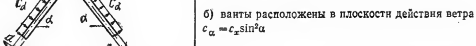
$d_{ср}$ — средний диаметр двух соседних цилиндров. Для случая когда $\frac{a_{n-1}}{d_{ср}} \neq \frac{a_n}{d_{ср}}$, η_2 для n-го цилиндра принимается как большее значение из двух, вычисленных в зависимости от $\frac{a_{n-1}}{d_{ср}}$ и $\frac{a_n}{d_{ср}}$.

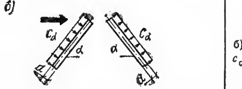
г) Для $0 \leqslant \alpha < 30°$ коэффициенты c_x определяются по п. «б», для $75° < \alpha < 90°$ коэффициенты c_x определяются по п. «в», для $30° < \alpha < 75°$ коэффициенты c_x определяются как для одиночных цилиндров

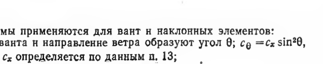
Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов
20  	Полая полусфера, обращенная вогнутой стороной к ветру, $c_n=1,4$; составляющая ветровой нагрузки, нормальная основанию полусферы, имеет максимальную величину, когда угол α, составленный направлением ветра с нормалью к поверхности, равен 30—60° Полая или сплошная полусфера, обращенная выпуклой стороной к ветру, $c_n=0,4$ Сплошная полусфера и круглый диск, $c_n=1,4$ Сфера При $Re<1,5\cdot10^5$; $c_x=0,50$; при $1,5\cdot10^5<Re<4\cdot10^5$, $c_x=0,65-0,075\ vd\sqrt{n_{\text{н}}q}$; при $Re>4\cdot10^5$; $c_x=0,2$

21







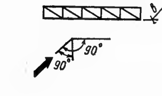
Схемы применяются для вант и наклонных элементов:
а) ванта и направление ветра образуют угол θ; $c_\theta = c_x \sin^2\theta$, где c_x определяется по данным п. 13;

б) ванты расположены в плоскости действия ветра $c_\alpha = c_x \sin^2\alpha$

Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов
22	Схема применяется для различных профилей решетчатых конструкций при направлении ветра, перпендикулярном оси элемента, $c_x = 1,4$
23	Коэффициент лобового сопротивления $c_ф$ для плоской фермы определяется по формуле $$c_ф = \frac{\Sigma c_{xi} f_i}{S},$$ где f_i — площадь проекции элемента фермы на ее плоскость; c_{xi} — коэффициент лобового сопротивления элемента фермы, принимаемый в соответствии с данными пп. 13, 22; S — площадь фермы, вычисленная по наружному габариту. Если для всех элементов фермы $c_{xi} = c_x$, то $c_ф = c_x \varphi$, где $\varphi = \frac{\Sigma f_i}{S}$ — коэффициент заполнения фермы

24



Для ряда плоских параллельно расположенных ферм коэффициент $c_ф$ для первой фермы принимается по данным п. 23, для второй и последующих ферм из труб при $Re < 4 \cdot 10^5$, а также профилей — по формуле

$$c_ф^{*} = c_ф \eta,$$

где η — коэффициент, определяемый в зависимости от φ и b/h

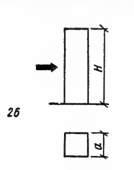
Коэффициент η

b/h	φ					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6 и выше
1/2	0,93	0,75	0,56	0,38	0,19	0
1	0,99	0,81	0,65	0,48	0,32	0,15
2	1	0,87	0,73	0,59	0,44	0,3
4	1	0,9	0,78	0,65	0,52	0,4
6	1	0,93	0,83	0,72	0,61	0,5

Для ферм из труб при $Re \geqslant 4 \cdot 10^5$ $\eta = 0,95$

Продолжение табл. 1

	Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов
25	а) h, l, b; 90°, 90°; б) h, b	Для пространственной фермы (а) и решетчатых башен (б) коэффициент лобового сопротивления $c_{пр}$ определяется по формуле $$c_{пр}=c_{ф}(1+\eta),$$ где $c_{ф}$ — коэффициент, определяемый по данным п. 23; η — коэффициент, определяемый по данным п. 24. Для трехгранной башни при $\varphi \geqslant 0{,}1$ коэффициент $c_{пр}$ умножается на 0,9. При определении $c_{пр}$ значения $c_{ф}$ вычисляются во всех случаях в предположении, что направление ветра перпендикулярно плоскости наветренной грани фермы (башни). При направлении ветра по диагонали четырехгранной квадратной башни аэродинамический коэффициент определяется путем умножения величины $c_{пр}$ на коэффициент, равный: 1,1 — для стальных башен из одиночных элементов; 1,2 — для железобетонных башен, для стальных башен из составных элементов; 1,3 — для деревянных башен из составных элементов

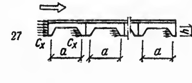


26

Для сооружений квадратных и многоугольных в плане коэффициент лобового сопротивления c_x принимается по таблице

Сечение	Направление ветра	H/a		
		25	7	1
Квадрат	Перпендикулярно грани	2	1,4	1,3
	По диагонали	1,5	1,1	1
Правильный 6—8-угольник при $Re \geqslant 4 \cdot 10^5$	Любое	1,4	1,2	1
Правильный 10—12-угольник при $Re \geqslant 4 \cdot 10^5$	Любое	1,2	1	0,8

Примечание. Для сооружений многоугольных в плане (при любом направлении ветра), а также квадратных в плане (при направлении ветра по диагонали) a — диагональ сечения



27

Схема применяется для открытых этажерок. Коэффициент лобового сопротивления для каждой стойки этажерки при любом направлении ветра принимается равным 1,4. Коэффициент c_x для балок перекрытия принимается в зависимости от отношения a/h для первой балки $c_x=1,4$; для второй и последующих $c_{x1}=c_x\eta$, где η определяется по таблице

a/h	$\leqslant 4$	6	8	>10
η	0,4	0,5	0,8	1

Если высота впереди расположенной балки меньше высоты следующей за ней балки, то снижение коэффициента c_x для защищенной балки распространяется лишь на часть высоты ее, равной передней балки; для выступающей части балки $c_x=1,4$

Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов
28 а) б)	Схемы применяются для отдельно стоящих стен и панелей

а) стена над землей

α	B/H		
	∞	10	1
$\alpha=0$ ($e_a=0$)	2	1,3	1,15
$\alpha=40°$ ($e_a=0,2B$)	—	1,6	—
$\alpha=50°$ ($e_a=0,1B$)	—	—	1,8

б) стена на земле

α	B/H		
	∞	10	1
$\alpha=0$ ($e_a=0$)	1,2	1,2	1,1
$\alpha=40°$ ($e_a=0,2B$)	—	1,5	—
$\alpha=50°$ ($e_a=0,1B$)	—	—	1,5

29

$H:e:B = 1:1:10$

Схема применяется для закрытых галерей
Коэффициенты давления C при ветре, нормальном наветренной грани

Коэффициент	A	B	C	D
c	0,8	—1,2	—1,4	—1,5

30

Схема применяется для покрытий ангаров, складов и т. д.

Значения c_1, c_2 и c_3.

B/D	$\alpha°$	c_1	c_2	c_3
1/2	0	+0,7	—0,9	—0,4
	30	+0,7	—1	—0,8
	60	—0,8	—0,7	—0,7
	90	—0,8	—0,7	—0,8
1	0	+0,6	—0,9	—0,5
	30	+0,7	—0,9	—0,8
	60	—0,8	—0,9	—0,8
	90	—1,1	—0,9	—1,1
2	0	+0,5	—1,1	—0,8
	30	+0,7	—1,9	—1,1
	60	—1,1	—0,9	—1,1
	90	—1	—1,1	—0,8

Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов				
	B/D	$\alpha°$	c_1	c_2	c_3
	4	0 30 60 90	+0,5 +0,7 —1 —1	—1,1 —2 —1,1 —0,8	—0,6 —1,2 —0,8 —1
	Коэффициенты c_n, c_t и c_z				
	Коэффициенты	$\alpha°$			
		0	30	60	90
	c_n— для направления, перпендикулярного оси цилиндра	0,6	0,8	0,5	0
	c_t— для направления, параллельного оси цилиндра	0	0,75	1,1	1,2 при $\frac{B}{D}=0,5$ 1 » $\frac{B}{D}=1,5$ 1,1 » $\frac{B}{D}=4$

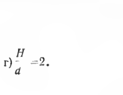
	c_z	—0,3 при $\frac{B}{D}=0,5—1$; —0,4 при $\frac{B}{D}=1,5—4$	—0,3 при $\frac{B}{D}=0,5$; —0,55 при $\frac{B}{D}=1,5—4$	—0,3 при $\frac{B}{D}=0,5—1,5$; —0,4 при $\frac{B}{D}=1,5—4$	—0,2



Схемы применяются для полусферы, сопряженной с цилиндром. На схемах показаны линии одинакового давления ветра на полусферу и соответствующие им коэффициенты давления: а) $H/d=0,05$: H — высота цилиндра, d — его диаметр;

Продолжение табл. 1

Профиль здания, сооружения, элемента и схемы ветровой нагрузки	Указания по определению аэродинамических коэффициентов
31 б)	б) $\frac{H}{d}=0,25$;
в)	в) $\frac{H}{d}=0,75$;



а)

32

б)

г) $\frac{H}{d}=2$.

Схемы применяются:

а) для конуса и пирамиды с квадратным основанием, расположенных на поверхности земли:

для конуса $c_x=0,7$; $c_z=-0,3$;
для пирамиды $c_x=1,2$; $c_z=-0,3$;

б) для конусов, аэродинамически изолированных в пространстве:

конус без днища при $\alpha=30°$; $c_x=0,35$;
конус без днища при $\alpha=60°$; $c_x=0,5$;

конус без днища $c_x=1,4$ } эти значения c_x могут
конус с днищем $c_x=1,2$ } быть использованы при $Re>10^6$

Таблица 2

Аэродинамические коэффициенты для отдельных элементов из профилей плоских и пространственных ферм

1. Коэффициенты c_n и c_t для отдельных элементов из профилей

α	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$
0°	+1,9	+0,95	+1,8	+1,8	+1,75	+0,1
45°	+1,8	+0,8	+2,1	+1,8	+0,85	+0,85
90°	+2	+1,7	−1,9	−1	+0,1	+1,75
135°	−1,8	−0,1	−2	+0,3	−0,75	+0,75
180°	−2	+0,1	−1,4	−1,4	−1,75	−0,1

Продолжение

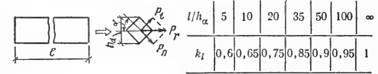
α	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$
0°	+1,6	0	+2	0	+2,05	0
45°	+1,5	−0,1	+1,2	+0,9	+1,85	+0,6
90°	−0,95	+0,7	−1,6	+2,15	0	+0,6
135°	−0,5	+1,05	−1,1	+2,4	−1,6	+0,4
180°	−1,5	0	−1,7	+2,1	−1,8	0

α	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$
0°	+1,4	0	+2,05	0	+1,6	0
45°	+1,2	+1,6	+1,95	+0,6	+1,5	+1,5
90°	0	+2,2	+0,5	+0,9	0	+1,9

Продолжение

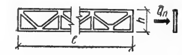
α	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$	$c_{n\infty}$	$c_{t\infty}$
0°	+2	0	+2,1	0	+2	0
45°	+1,8	+0,1	+1,4	+0,7	+1,55	+1,55
90°	0	+0,1	0	+0,75	0	+2

k_l — коэффициент перехода от элемента бесконечной длины к элементу с отношением $\lambda = l/h_{\alpha}$



l/h_{α}	5	10	20	35	50	100	∞
k_l	0,6	0,65	0,75	0,85	0,9	0,95	1

2. Коэффициент лобового сопротивления для плоских ферм из профилей

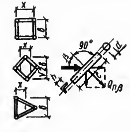


l/h	k_l при φ				
	0,25	0,5	0,9	0,95	1
5	0,96	0,91	0,87	0,77	0,6
20	0,98	0,97	0,94	0,89	0,75
50	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90
∞	1	1	1	1	1

$Q_n = k_l c_{n\infty} qS$;
$k_l = c_{nl}/c_{n\infty}$.

φ	0	0,1	0,15	0,2	0,3—0,8	0,95	1
$c_{n\infty}$	2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,8	2

3. Пространственная ферма с коэффициентом заполнения $\varphi=0,3$:
для элементов наветренной грани $Q_{n\beta i}=k_{li}c_{\infty\beta}qS_i\cos\beta$;
» » заветренной » $Q_{n\beta i}=k_{li}c_{\infty\beta}qS_i\eta\cos\beta$,
где $S_i=hl$ или dl;
для элементов из прокатных профилей $c_{\infty\beta}=k_\beta c_{n\infty}$ или $k_\beta c_{t\infty}$,
где $c_{n\infty}$ или $c_{t\infty}$ принимается по п. 1 настоящей таблицы.



β	Элементы из прокатных профилей			Трубчатые элементы $Re<4\cdot10^5$			Трубчатые элементы $Re>4\cdot10^5$		
	k_β	k_{li}	η	$c_{\infty\beta}$	k_{li}	η	$c_{\infty\beta}$	k_{li}	η
0°	1	по п. 1 настоящей таблицы	по п. 24, табл. 1, прил. 1	1,2	по п. 1 настоящей таблицы	по п. 24, табл. 1, прил. 1	0,6	0,9 для $l/d=$ =0,25	0,95
15°	0,98			1,16			0,58		
30°	0,93			1,04			0,53		
45°	0,88			0,85			0,42		
60°	0,8			0,6			0,28		

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ И МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ДЕЙСТВИЕ ВЕТРА

1. СТРУКТУРА ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ВЕТРА

Ветер, возникающий в атмосфере, представляет собой турбулентное движение среды, которое характеризуется чрезвычайно нерегулярным и беспорядочным изменением скорости во времени в каждой точке пространства. Так же нерегулярно изменяется от точки к точке скорость потока, рассматриваемая в заданный момент времени.

Мгновенное значение скорости в турбулентном потоке можно представить как результат наложения пульсационной составляющей скорости на ее среднее значение. Если пульсационная составляющая равна нулю, движение является ламинарным.

Ламинарное движение становится турбулентным, когда число Рейнольдса превосходит некоторое критическое значение, т. е. $\frac{vL}{\nu} > Re_{кр}$, где v — характерная скорость потока, L — его характерный размер. $Re_{кр}$ соответствует условиям, когда силы инерции, действующие между удаленными друг от друга объемами воздуха, обладающими разной скоростью движения, становятся настолько большими по сравнению с силами вязкости, что формируется устойчивый турбулентный поток. Элемент этого потока с некоторым характерным размером (масштабом) называется турбулентным вихрем [19, 32].

По А. Н. Колмогорову [29], турбулентное движение в атмосфере представляет собой процесс последовательного распада крупномасштабных вихрей (вихрей первого порядка), возникающих в неустойчивом осредненном потоке при больших числах Рейнольдса, на вихри с меньшими масштабами (вихри высокого порядка). Этот процесс продолжается до тех пор, пока влияние вязкости на мелкомасштабные вихри с достаточно малым числом Рейнольдса уже ощутимо и препятствует образованию вихрей более высокого порядка.

Кинетическая энергия турбулентного движения переходит от вихрей большого масштаба, черпающих свою энергию от основного потока, к вихрям с меньшими масштабами, практически не диссипируясь. Диссипация энергии потока (переход кинетической энергии в тепло) происходит в самых мелкомасштабных вихрях.

Средняя величина турбулентной энергии, отнесенной к единице массы, равна полусумме средних квадратов пульсаций продольной, поперечной и вертикальной составляющих скорости ветра. Распределение энергии по высоте зависит от неоднородности подстилающей поверхности и температурной стратификации атмосферы. При больших скоростях ветра температурная стратификация близка к безразличной, поэтому в дальнейшем пульсация составляющих скорости рассматривается только при этом состоянии атмосферы.

Напомним, что стратификация называется безразличной, если температура во всем слое, начиная от поверхности земли, падает, причем градиент по всему слою одинаков и составляет не более 1°/100 м.

При изучении поведения высоких сооружений и зданий в потоке ветра решающее значение имеет продольная компонента скорости $v(t) = \bar{v} + v'(t)$. В отличие от поперечной и вертикальной составляющих скорости $v(t)$ имеет достаточно большую постоянную составляющую $\bar{v}$, средний квадрат пульсации $\sigma_{v'}^2$ определяется горизонтальными вихрями, размеры которых не ограничены расстоянием до подстилающей поверхности. Отсюда следует, что на долю продольной компоненты скорости приходится максимальное количество кинетической энергии турбулентного движения.

2. ПАРАМЕТРЫ ТУРБУЛЕНТНОСТИ (ИНТЕНСИВНОСТЬ, МАСШТАБЫ). ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ. ФУНКЦИЯ КОГЕРЕНТНОСТИ

Интенсивность турбулентности γ_T на уровне z равна отношению $\sigma_{v'}(z)/\overline{v(z)}$, где $\sigma_{v'}(z)$ — стандарт пульсации продольной компоненты скорости, $\overline{v(z)}$ — ее среднее значение на том же уровне.

При безразличной стратификации стандрат продольной пульсации пропорционален скорости на некотором фиксированном уровне, причем от высооты $\sigma_{v'}$ слабо зависит. Поскольку скорость ветра в пограничном слое воздуха растет с высотой, интенсивность турбулентности γ_T с увеличением высоты убывает.

Стандарт продольных пульсаций может быть приближенно вычислен по формуле $\sigma_{v'} = cv_T$, где v_T — скорость поверхностного трения, равная корню квадратному из касательного напряжения на единицу массы. Коэффициент c не зависит от высоты, но, по-видимому, различен для различных масштабов. В качестве примеров численных значений этой постоянной можно указать: 2,45 (среднее значение для различных типов подстилающей поверхности, по Давенпорту), 2,5 (Австралия), 2,1 (Брукхевен). Если принять $c = 2{,}5$, то $\sigma_{v'} = v(z)/\ln(z_0/10)$, где z_0 — параметр шероховатости [30].

На основе анализа данных измерений можно заключить, что хотя стандарт пульсации на разных уровнях приблизительно одинаков, ее спектральный состав меняется от высокочастотных гармоник у подстилающей поверхности до медленных колебаний скорости на больших высотах.

Масштабы турбулентности. Пространственное представление о турбулентности потока можно получить, зная ее интегральные масштабы длины (продольный, поперечный и вертикальный), определяющие характерные размеры энергосодержащих вихрей.

Интегральный продольный масштаб L_i^x для i-ой составляющей скорости ветра в направлении среднего потока определяется по формуле

$$L_i^x = \bar{v} T_{Mi}^x,$$

где $T_{Mi}^x = \int_0^\infty R_i^{н}(\tau)\, d\tau$ — интегральный временной масштаб; $R_i^{н}(\tau)$ — нормированная корреляционная функция пульсации составляющей скорости; $\bar{v}$ — средняя скорость ветра.

Здесь используется гипотеза «замороженной турбулентности» Тейлора, согласно которой по пульсацям скорости в фиксированной точке можно приближенно судить о структуре пространственного распределения этой величины вдоль прямой, проходящей через данную точку параллельно направлению потока. Пульсацию в данной точке можно приближенно интерпретировать как результат переноса через эту точку со средней скоростью и без искажений совокупности турбулентных вихрей, расположенных вдоль прямой вверх по течению.

Интегральный вертикальный масштаб L_i^z перпендикулярен направлению потока

$$L_i^z = \int\limits_0^\infty R_{\text{п}i}^{\text{н}}(\Delta z)dz,$$

где $R_{\text{п}i}^{\text{н}}$ (Δz) — нормированная пространственная корреляционная функция пульсации i-ой составляющей скорости ветра; Δz — расстояние между двумя точками по вертикали.

Поскольку поток ветра несимметричен относительно поверхности земли, то для каждого уровня существуют два вертикальных масштаба: $L_i^z \uparrow$ — при отсчете интервалов корреляции вверх и $L_i^z \downarrow$ при отсчете вниз.

Интегральный поперечный масштаб корреляции L_i^y также перпендикулярен направлению потока.

$$L_i^y = \int\limits_0^\infty R_{\text{п}i}(\Delta y)\, dy,$$

где Δy — расстояние между двумя точками по горизонтали.

Как показывают эксперименты [59], масштабы турбулентности растут с увеличением высоты над уровнем земли.

Для составляющих скорости в продольном и поперечном направлениях продольные масштабы отличаются примерно в 2 раза.

Для продольной составляющей скорости $L_{v'}^z \approx \frac{1}{5} L_{v'}^x$ и $L_{v'}^y \approx$ $\approx \frac{1}{3} L_{v'}^x$;

Энергетические спектры пульсации компонент скорости ветра. При расчете высоких сооружений, чувствительных к динамическому воздействию ветра, необходимо знать распределение энергии турбулентного потока по частотам. Это распределение называют энергетическим спектром (спектральной плотностью) пульсации компонент скорости ветра.

Мы рассмотрим только энергетические спектры пульсации продольной и вертикальной компонент скорости.

Энергетический спектр продольных пульсаций можно условно разбить на четыре интервала: 1) интервал сверхнизких частот, определяемый наиболее крупными вихрями с размерами, сравнимыми с характерным масштабом потока; 2) область низких частот, несущих основную турбулентную энергию (в этой области энергетический спектр имеет наибольший максимум); 3) инерционный интервал. В этом интервале вихри теряют непосредственную связь с вихрями

большого масштаба, а их спектр определяется лишь параметрами турбулентного движения; 4) вязкий интервал — область наиболее высоких частот, в которой происходит основная диссипация турбулентной энергии.

В инерционном интервале турбулентности приписывается свойство изотропности, т. е. независимости свойств турбулентного движения от выбранного направления. Разработанная Колмогоровым теория локальной изотропной турбулентности [29] позволяет получить ценные результаты о локальных свойствах турбулентности непосредственно из соображений размерности.

В настоящее время имеются многочисленные измерения спектров пульсации продольной компоненты скорости. Достаточно ясно поведение этих спектров на высоких частотах. Для частот n, превышающих $0{,}2\ \bar{v}/z$, спектр Колмогорова удовлетворительно согласуется с измеренными спектрами.

При безразличной стратификации спектр Колмогорова для пульсации всех компонент вектора скорости в инерционном интервале имеет вид

$$S(n) = a\,(\varepsilon\bar{v})^{2/3}\,n^{-5/3},$$

где a — универсальная постоянная, равная для продольной компоненты — 0,147; для вертикальной — 0,196; n — частота, Гц; ε — скорость диссипации энергии.

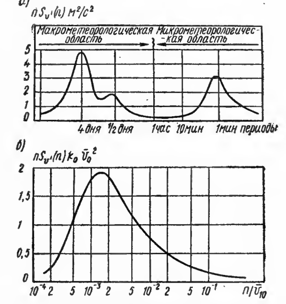


Рис. 1. Спектры пульсации продольной компоненты скорости
а — спектр Ван дер Ховена; *б* — спектр Давенпорта

На рис. 1, *а* приведен энергетический спектр пульсации продольной компоненты скорости в интервале периодов от 5 с до 10^3 ч, полученный Ван дер Ховеном [80]. Как видно, имеется два участка спектра: турбулентный с максимумом энергии, приходящимся на период $T \approx 1$ мин, и синоптический с максимумом энергии на период $T \approx 4$ сут и частным максимумом на $T = 10$ ч.

Между этими двумя максимумами существует широкий минимум спектра в интервале периодов от нескольких минут до нескольких часов. Это позволяет разбить спектр пульсаций скорости на два участка: микрометеорологический (высокочастотный) с периодами в секунды и минуты и макрометеорологический (низкочастотный) с периодами в десятки и сотни часов.

Наличие минимума позволяет представить ветровую нагрузку на сооружение в виде двух слагаемых, из которых одно соответствует в среднем установившейся скорости ветра и действует статически (статическая составляющая ветровой нагрузки), другое зависит от пульсационной части продольной компоненты скорости и оказывает на сооружение динамическое воздействие (динамическая составляющая ветровой нагрузки). Указанный минимум дает также возможность найти такой интервал осреднения продольной скорости ветра, который значительно превосходит период турбулентных пульсаций, но в то же время не слишком велик, чтобы длиннопериодные колебания влияли на средние значения скорости, полученные по этому интервалу.

В главе СНиП II-6-74 использован эмпирический спектр Давенпорта [56], полученный на основе анализа спектров продольной пульсации скорости при сильных ветрах. Этот спектр имеет вид

$$S_{v'}(n) = \frac{2k_0 v_0^2 u^2}{n(1+u^2)^{4/3}}, \quad (1)$$

где v_0 — средняя часовая скорость ветра на стандартной высоте анемометра (10 м); k_0 — коэффициент лобового сопротивления подстилающей поверхности, принимаемый в первом приближении равным 0,005 для открытой местности; 0,01 — для лесных массивов и жилых окраин городов; 0,04 — для центров городов; для открытого моря $k_0 = 0{,}002$; $u = nL/\bar{v}$ — приведенная частота, где $L = 1200$ м — масштаб длины.

Спектр Давенпорта на рис. 1, *б* представлен в безразмерной форме $nS_{v'}(n)/\sigma_{v'}^2$, где $S_{v'}(n)$ — энергетический спектр продольной компоненты скорости. По оси абсцисс отложены волновые числа $n/\bar{v}$ (частота, отнесенная к средней скорости на данном уровне). Как видно, имеется максимум спектра на длинах волн порядка 600—700 м. По данным Н. Ф. Мазурина [23], на уровне 8 м максимум спектра соответствует длинам волн порядка 500—600 м, на более высоких уровнях — 600—700 м. Таким образом, в пограничном слое атмосферы максимум спектра несколько смещается в сторону более низких частот по сравнению с приземным слоем, что свидетельствует об увеличении вклада низкочастотных гармоник в общую энергию.

Для принятого спектра интенсивность турбулентности

$$\gamma_{\text{т}}(z) = 2{,}45 k_0^{1/2} \left(\frac{z}{10}\right)^{-\alpha} \quad (2)$$

зависит от высоты и от параметра шероховатости подстилающей поверхности.

Средний квадрат пульсации скорости

$$\sigma_{v'}^2 = 6k_0 v_0^2. \quad (3)$$

Нормированный энергетический спектр пульсаций скорости имеет вид

$$S_{v'}^{\text{н}} = \frac{u^2}{3n(1+u^2)^{4/3}}. \quad (4)$$

Выражение (1) не учитывает изменчивость спектра с высотой. Измерения [59], выполненные в 60-метровом приземном слое, показывают, что энергия пульсации при 10 м больше, чем при 60 м, особенно в интервале частот от 0,1 до 1 Гц (рис. 2). Лучшее согласование с экспериментальными спектрами (рис. 3) можно полу-

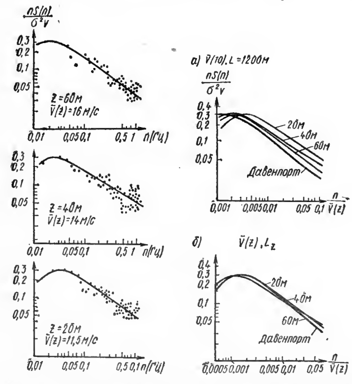


Рис. 2. Энергетические спектры пульсации скорости ветра

Рис. 3. Сравнение экспериментальных спектров со спектром Давенпорта

чить, если в (1) вместо средней скорости на стандартном уровне принять для безразмерной частоты выражение $u=\frac{nL_z}{\overline{v(z)}}$, где масштаб $L_z=\sqrt{3}\ \overline{v(z)}/n_{\text{пик}}$; $\overline{v(z)}$ — средняя скорость на уровне z; $n_{\text{пик}}$ — частота, Гц, соответствующая пику энергетического спектра.

Отметим, что спектр Давенпорта хорошо согласуется с предсказанием теории в инерционном интервале, т. е. при больших значениях u. В области низких частот выражение (1) пропорционально n и при $n=0$ оно равно нулю, в то время как согласно теории энергетический спектр стремится к константе.

Действительно

$$\frac{S_{v'}(n)}{\sigma_{v'}^2}=2\int\limits_0^\infty R_{v'}^{\text{н}}(\tau)\cos 2\pi n\tau d\tau.$$

Так как интегральный масштаб времени $T_{\text{м}}=\int\limits_0^\infty R_{v'}^{\text{н}}(\tau)\,d\tau$, то при $n=0$ $S_{v'}(0)/\sigma_{v'}^2=2T_{\text{м}}$. Таким образом, для спектра Давенпорта интегральный масштаб времени теоретически равен нулю.

Несмотря на указанные замечания, спектр Давенпорта экспериментально надежно обоснован и в настоящее время наиболее часто используется в инженерных приложениях.

Харрис [55] и Хино [65] предложили спектр типа Кармана [19]

$$S_{v'}(n)=\sigma_{v'}^2\frac{k_1u}{n(1+u^2)^{5/6}},\tag{5}$$

где $u=L(z)n/\overline{v(z)}$; $k_1=0{,}4751$.
Для $L(z)$ рекомендуется следующее выражение:

$$L(z)=\frac{363{,}6\gamma_{\text{т}}^3(10)}{\alpha_t^3}\left(\frac{z}{10}\right)^{1-3\alpha_t},\tag{6}$$

где α_t — показатель степени в законе, описывающем изменение скорости ветра по высоте; $\gamma_{\text{т}}(10)$ — интенсивность турбулентности на уровне 10 м, принимаемая по формуле (2). Предложенный спектр показывает незначительное изменение его формы с увеличением расстояния от поверхности земли.

Важное значение имеет частота $n_{\text{пик}}$ гармоники турбулентного движения, содержащей максимальную энергию. В спектре Давенпорта $n_{\text{пик}}$ не зависит от высоты, шероховатости подстилающей поверхности и от скорости ветра, тогда как данные в работе [50] показывают, что частота $n_{\text{пик}}$ спектра сдвигается в сторону низких частот при увеличении расстояния от земли.

Полученная в работе [65] формула для определения частоты пикового значения спектра имеет вид

$$n_{\text{пик}} = 0,00336 \frac{v_0\, \alpha_t^3}{\gamma_T^3\,(10)} \left(\frac{z}{10} \right)^{4\alpha_t - 1}. \tag{7}$$

В последние годы выдвинуто немало предложений для спектров пульсации скорости сильных ветров [67]. Общее для этих спектров то, что на высоких частотах они близки к закону Колмогорова минус $^5/_3$, однако о низкочастотной области спектра высказываются различные точки зрения.

Энергетический спектр пульсации вертикальной компоненты скорости, предложенный Кеймалом [67], имеет вид

$$S_{w'}(n,z) = k_0\, v_0^2 \frac{2f}{1 + 5,3 f^{5/3}}. \tag{8}$$

Здесь $f = \dfrac{nz}{v_0}$ — отношение высоты к длине волны.

Функция когерентности. Пространственное распределение порывов описывает функция когерентности, которая характеризует корреляцию порывов между двумя точками в пространстве для данной частоты n.

Для продольной компоненты скорости взаимная корреляционная функция между пульсациями в двух точках z_1 и z_2 по высоте имеет вид

$$R_{v'}(z_1, z_2, \tau) = \overline{v'(z_1, t)\, v'(z_2, t + \tau)},$$

Эту функцию можно разбить на четную и нечетную составляющие

$$R_{v'}(z_1, z_2, \tau) = \frac{1}{2}\,[R_{v'}(z_1, z_2, \tau) + R_{v'}(z_1, z_2, -\tau)] +$$

$$+ \frac{1}{2}\,[R_{v'}(z_1, z_2, \tau) - R_{v'}(z_1, z_2, -\tau)] = E_{v'}(z_1, z_2, \tau) + O_{v'}(z_1, z_2, \tau).$$

Обратным преобразованием Фурье получим взаимную спектральную плотность

$$S_{v'}(z_1, z_2, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E_{v'}(z_1, z_2, \tau) \cos \omega\tau \, d\tau - i \int_{-\infty}^{\infty} O_{v'}(z_1, z_2, \tau) \sin \omega\tau \, d\tau =$$

$$= CO(z_1, z_2, \omega) - iK(z_1, z_2, \omega),$$

где $CO(z_1, z_2, \omega)$ — коспектр или взаимный спектр; $K(z_1, z_2, \omega)$ — квадратурный спектр.

Величина

$$\overline{v'(z_1, t)\, v'(z_2, t)} = R_{v'}(z_1, z_2, 0) = E_{v'}(z_1, z_2, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \times$$

$$\times CO(z_1, z_2, \omega)\, d\omega.$$

называется ковариацией. Взаимный спектр характеризует вклад различных частот в коварнацию. Квадратурный спектр равен нулю при четной функции $R_{v'}(z_1, z_2, \tau)$. Нечетность последнего обычно связана с наличием максимальной корреляции между $v'(z_1, z_2, t)$ и $v'(z_1, z_2, t+\tau)$ при нулевом сдвиге по времени.

Когерентная функция (когерентность) записывается в виде

$$\text{coherence}\,(z_1, z_2, \omega) = \frac{|S_{v'}(z_1, z_2, \omega)|^2}{S_{v'}(z_1, \omega)\, S_{v'}(z_2, \omega)} = \frac{CO^2(z_1, z_2, \omega) + K^2(z_1, z_2, \omega)}{S_{v'}(z_1, \omega)\, S_{v'}(z_2, \omega)}.$$

Поскольку взаимная спектральная плотность сигналов на входе и выходе линейной динамической системы равна спектральной плотности сигнала на входе, умноженной на передаточную функцию системы, можно записать

$$S_{v'}(z_1, z_2, u) = S_{v'}(z_0, u)\, R_{v'}(z_1, z_2, u), \tag{9}$$

где $R_{v'}(z_1, z_2, u)$ — коэффициент взаимной корреляции гармоник скоростей (с безразмерной частотой u) на уровнях z_1 и z_2. $S_{v'}(z_0, u)$ — спектральная плотность пульсации скорости на стандартном уровне z_0 (10 м).

Здесь принято, что средний квадрат пульсации продольной компоненты скорости и ее нормированная спектральная плотность не зависят от высоты.

Знигер и Давенпорт [54] по измерениям на мачтах высотой 120 и 150 м в лесной и открытой местностях установили, что мнимой частью коэффициента взаимной корреляции, а следовательно, и квадратурным спектром можно пренебречь.

В этом случае коэффициент взаимной корреляции можно принять равным корню квадратному из функции когерентности

$$R_{v'}(z_1, z_2, u) = \frac{S_{v'}(z_1, z_2, u)}{S_{v'}(z_0, u)} = \sqrt{\text{coherence}}.$$

Коэффициент взаимной корреляции зависит от расстояния между уровнями $\Delta z = z_1 - z_2$, отнесенного к длине волны $\bar{v}/n$. Установлено, что если Δz измерить в единицах длин волн (ось абсцисс $\Delta z = n/\bar{v}$), то корреляция уменьшается с одинаковой скоростью для всех длин волн и может быть аппроксимирована выражением типа

$$R^{\text{н}}_{v'}(\Delta z, n) = e^{-c\frac{n\Delta z}{\bar{v}}}, \tag{10}$$

где $c = \bar{v}/nL(\bar{v}/n)$. Интегральный вертикальный масштаб

$$L\left(\frac{\bar{v}}{n}\right) = \int_0^\infty R^{\text{н}}_{v'}\left(\Delta z, \frac{n}{\bar{v}}\right) d(\Delta z). \tag{11}$$

Коэффициенту c в выражении (10) можно дать такое толкование. Как известно, площадь под кривой $R^{\text{н}}_{v'}(\Delta z, n)$ численно равна

полумасштабу продольной пульсации v' в направлении корреляции. Так как эта площадь равна $1/c$, то масштаб v' в вертикальном направлении, измеряемый в длинах волн, равен $2/c$. Таким образом, в атмосфере размер вихря по вертикали составляет около $^1/_4$ его длины волны.

Для устойчивых атмосферных условий в табл. 1 приведены значения коэффициента c для различных направлений и компонент пульсации скорости ветра, полученные Крамером и Давенпортом [53].

Таблица 1

Направление сдвига	Компоненты пульсации ветра	c
Продольное	Продольная	8 (8)
	Поперечная	6
Поперечное	Продольная	40 (20)
	Поперечная	25
Вертикальное	Продольная	7 (8)
	Поперечная	7

В скобках указаны значения c, принятые в разделе «Ветровые нагрузки» главы СНиП II-6-74.

3. НОРМАТИВНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ СКОРОСТНЫЕ НАПОРЫ ВЕТРА

При определении статической составляющей ветровой нагрузки на сооружение основной характеристикой ветрового режима местности является нормативный скоростной напор ветра. Его величина для данного географического района устанавливается на основе статистического анализа климатологических данных по скоростям ветра в этом районе.

Главной геофизической обсерваторией им. Воейкова разработаны карты скоростей ветра различной обеспеченности. Вся территория СССР по этим картам разбита на семь районов. Приведенные для каждого района скорости относятся к высоте 10 м (уровень анемометра), соответствуют 2-минутному осреднению и условиям открытого незащищенного места.

Для установления нормативных значений скоростей для различных районов СССР использована функция распределения Вейбулла, построенная на основе многолетних совокупностей «срочных» наблюдений без учета направления

$$F(v) = P(V > v) = e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^{\gamma}}, \tag{12}$$

где $F(v)$ — вероятность того, что скорость ветра V превосходит величину v; β и γ — параметры, зависящие от ветрового режима данного района.

Для определения скоростей ветра заданной обеспеченности используется метод статистической экстраполяции [1].

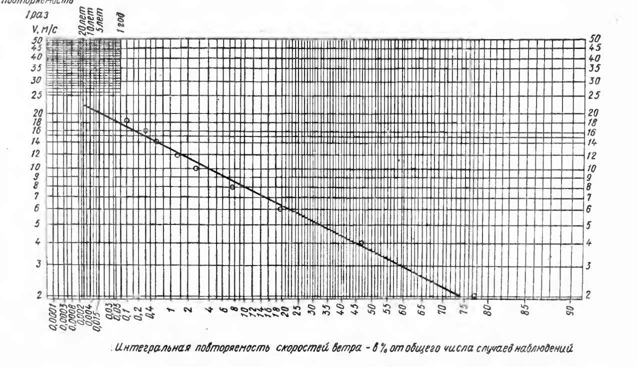


Рис. 4. Номограмма для определения скоростей ветра различной вероятности вне зависимости от направления ветра (Москва, Сельскохозяйственная академия)

Номограмма для сглаживания кривой распределения скоростей ветра приведена на рис. 4. По оси абсцисс отложена в билогарифмическом масштабе функция F, %, а по оси ординат — в логарифмическом масштабе скорости ветра, м/с. Кроме того, на оси абсцисс отложена величина n, показывающая, во сколько лет наблюдается один случай заданной скорости. Связь n и $F(v)$ выражается соотношением

$$n = \frac{1}{NF(v)},$$

где N — число наблюдений в течение года.

При помощи номограммы скорости ветра заданной обеспеченности определяются следующим образом.

В Справочнике по климату СССР, часть III [28], табл. 5 приведены вероятности скорости ветра по градациям (в % от общего числа наблюдений за каждый год). Интегральные вероятности вычисляются путем суммирования числа случаев от наибольших значений скорости к наименьшим. Эти повторяемости наносятся на номограмму, по точкам проводится прямая линия от 2 м/с до наибольших наблюдаемых скоростей и далее продолжается до пересечения с вертикальной линией, соответствующей заданной повторяемости.

Таблица 2

Период повторяемости	Скорость ветра для района						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Год	17	20	23,5	27	30	33,1	36
5 лет	20,8	23,8	27,3	31,3	34	37,7	40,4
10 »	22	25,8	29	32,8	36,2	39,5	44,5
20 »	23,5	27	31	34,2	38	41,2	45
30 »	24	27,4	31,5	35	38,6	41,8	45,8
50 »	25	29,2	32,8	36,5	40	43,2	48

Скорости ветра различной обеспеченности для семи районов СССР, м/с, приведены в табл. 2 [27].

Учет направления ветра может дать существенное снижение ветровой нагрузки для сооружений, при расчете которых имеют значение ветры одного-двух румбов [26].

При определении периодов повторяемости скорости ветра для рассматриваемого румба следует учесть, что при обработке всей совокупности срочных наблюдений периодам повторяемости $n=1$, 5, 10, 15, 20 лет соответствуют значения $F(x) = \frac{1}{4 \cdot 365n}$ (при 4 срочных наблюдениях в сутки), а именно 0,0684%; 0,0137%; 0,00684%; 0,00457%; 0,00342%. При обработке данных по отдельным румбам α соответствующие значения $F(x/\alpha)$ должны быть определены по формуле

$$F(x/\alpha) = \frac{F(x)}{P(\alpha)}, \tag{13}$$

где $P(\alpha)$ — повторяемость ветров рассматриваемого румба.

Для описания распределения годичных и месячных максимумов скоростей ветра может быть использовано распределение Гумбеля

$$F_1(v) = P(V < v) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{v-\alpha}{\beta_1}\right)\right], \qquad (14)$$

$$-\infty < v < \infty; \quad \alpha > 0; \quad \beta_1 > 0,$$

где V, v — случайная величина и ее текущее значение; α — параметр положения; β_1 — масштабный параметр (пропорционален среднему квадратичному отклонению).

Таблица 3

Повторяемость	Скорость ветра, м/с										
	0—1	2—3	4—5	6—7	8—9	10—11	12—13	14—15	16—17	18—20	21—24
Дифференциальная	22,2	31,5	26,3	12,3	4,9	1,4	0,8	0,3	0,2	0,1	0,01
Интегральная	100	77,81	46,31	20,01	7,71	2,81	1,41	0,61	0,31	0,11	0,01

Способ построения шкалы на вероятностной бумаге для рассматриваемого распределения описан в работе [20].

Расчетные скоростные напоры устанавливаются с учетом специфики и особенностей работы здания или сооружения.

Период однократного превышения расчетных скоростных напоров принят следующий: для жилых, общественных и промышленных зданий 10—15 лет (коэффициент перегрузки $n_п = 1{,}2$); для высоких сооружений (башни, мачты и т. п.) — 20—50 лет ($n_п = 1{,}3$—$1{,}5$).

Пример 1. По данным наблюдений метеорологической станции (Москва, Сельскохозяйственная академия) определить скорость ветра, превышаемую в среднем один раз в 5 лет.

В табл. 3 записаны вероятности скорости ветра по градациям через 2 м/с от общего числа наблюдений за год, приведенные в табл. 5. Справочника по климату СССР, часть III, и интегральные вероятности, вычисленные путем суммирования числа случаев от наибольших значений скорости к наименьшим. Эти повторяемости наносятся на номограмму (рис. 4), по точкам проводят прямую от 2 м/с до вертикали, соответствующей периоду повторяемости 5 лет, и определяют требуемую скорость ветра $v_5 = 20$ м/с.

Пример 2. Для метеорологической станции (Москва, Сельскохозяйственная академия) установить скорость ветра, отвечающие периоду повторяемости 5 лет для северного и северо-восточного румбов.

По табл. 7 Справочника по климату СССР, часть III вычисляются скорости ветра по градациям (%) для 8 румбов путем осреднения приведенных в таблице вероятностей за месяц. Определяются интегральные повторяемости для каждого румба, которые наносятся на номограмму.

Вероятности скорости ветра по направлениям, %, приведены в табл. 4. Для каждого румба в числителе левого столбца таблицы

Таблица 4

Градация скорости, м/с	Вероятности скорости ветра по направлениям															
	С		СВ		В		ЮВ		Ю		ЮЗ		З		СЗ	
	дифференциальная	интегральная	дифференциальная	интегральная	дифференциальная	интегральная	дифференциальная	интегральная	дифференциальная	интегральная	дифференциальная	интегральная	дифференциальная	интегральная	дифференциальная	интегральная
0—1	36,3 / 3,025	11,36 / 100	32,5 / 2,708	7,41 / 100	25,8 / 2,15	7,20 / 100	30,3 / 2,525	11,96 / 100	28,8 / 2,4	13,89 / 100	41,8 / 3,483	16,60 / 100	41,6 / 3,467	15,53 / 100	41,4 / 3,45	16,05 / 100
2—5	72,9 / 6,07	8,34 / 73,38	48,6 / 4,05	4,70 / 63,44	51,6 / 4,3	5,05 / 70,15	81,6 / 6,8	9,45 / 78,32	97,8 / 8,15	11,49 / 82,73	12,5 / 10,792	13,12 / 79,02	116,0 / 9,667	12,06 / 77,67	105,8 / 8,817	12,60 / 78,51
6—9	21,9 / 1,82	2,26 / 19,93	6,8 / 0,567	0,65 / 8,76	8,3 / 0,692	0,75 / 10,44	27,4 / 2,283	2,65 / 22,16	35,0 / 2,917	3,34 / 24,06	25,7 / 2,142	2,32 / 14,0	25,4 / 2,117	2,39 / 15,41	36,9 / 3,075	3,78 / 23,58
10—13	3,6 / 0,3	0,44 / 3,87	0,62 / 0,052	0,082 / 1,11	0,69 / 0,0575	0,06 / 0,83	3,66 / 0,305	0,37 / 3,10	4,0 / 0,333	0,43 / 3,67	1,63 / 0,136	0,182 / 1,096	2,73 / 0,227	0,28 / 1,78	6,3 / 0,525	0,71 / 4,42
14—17	1,19 / 0,099	0,14 / 1,23	0,26 / 0,022	0,03 / 0,41	0,03 / 0,0025	0,0025 / 0,03	0,66 / 0,055	0,066 / 0,55	1,06 / 0,088	0,093 / 0,676	0,55 / 0,046	0,046 / 0,28	0,59 / 0,049	0,049 / 0,32	1,83 / 0,153	0,185 / 1,15
18—20	0,49 / 0,041	0,04 / 0,36	0,1 / 0,008	0,008 / 0,11	—	—	0,13 / 0,011	0,011 / 0,09	0,06 / 0,005	0,005 / 0,04	—	—	—	—	0,39 / 0,033	0,033 / 0,20

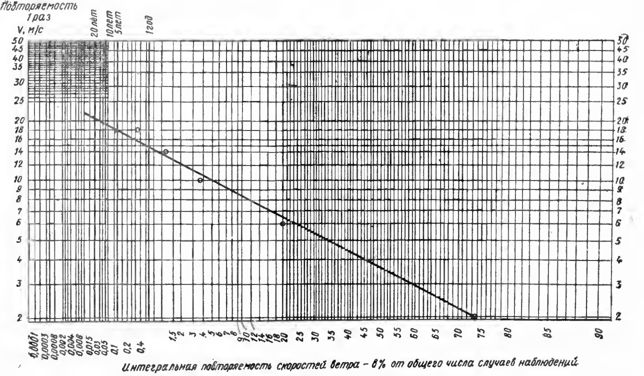


Рис. 5. Номограмма для определения скоростей ветра различной вероятности. Северное направление ветра (Москва, Сельскохозяйственная академия)

даны вероятности скорости по градациям, %, за месяц, в знаменателе — за год. В числителе правого столбца даны интегральные повторяемости, в знаменателе — их относительные значения. Последние наносятся на номограмму.

Условные вероятности $F(x/\alpha)$ определяются по формуле (13). Для северного и северо-восточного румбов при $P_{с}(\alpha)=11{,}36\%$ и $P_{с\text{-}в}(\alpha)=7{,}41\%$ (см. табл. 4) периоду повторяемости 5 лет соответствуют условные вероятности $F_{с5}(x/\alpha)=0{,}12\%$; $F_{с\text{-}в5}(x/\alpha)=0{,}185\%$.

На рис. 5 приведена номограмма для определения скоростей ветра различной вероятности для северного румба. Как это видно, нормативная скорость $v_{с5}=18$ м/с.

Из рассмотрения скоростей, соответствующих нормативной повторяемости (5 лет), следует, что значения $v_5(\alpha)$, установленные для отдельных румбов, получаются меньше модуля скорости ветра v_5 по всем направлениям.

4. *ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ НОРМАТИВНЫХ СКОРОСТЕЙ И СКОРОСТНЫХ НАПОРОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ*

В настоящее время для описания вертикальных профилей средних скоростей ветра используются:

степенной закон

$$v(z)=v_{\text{анем}}\left(\frac{z}{z_{\text{анем}}}\right)^{\alpha}, \tag{15}$$

где $v(z)$ и $v_{\text{анем}}$ — скорости ветра на уровне z и на стандартном уровне расположения анемометра (10 м). Показатель степени зависит от температурной стратификации, шероховатости подстилающей поверхности и от самой скорости ветра;

логарифмический закон

$$v(z)=v_{\text{анем}}\frac{\ln\frac{z}{z_0}}{\ln\frac{z_{\text{анем}}}{z_0}}, \tag{16}$$

где z_0 — параметр шероховатости.

Точность аппроксимации профилей ветра в приземном слое атмосферы степенным или логарифмическим законами рассматривалась во многих работах.

В работах [18, 22] такое сравнение проведено по данным достаточно надежных измерений, проводившихся до высоты 300 м на мачте в Обнинске. Кроме того, были обработаны результаты наблюдений на телевизионной мачте в Киеве и на нескольких мачтах за рубежом. Профили ветра осреднялись по скорости ветра как у поверхности земли, так и на высотах, а также по типу температурной стратификации атмосферы. Было установлено, что средние скорости ветра в слое атмосферы до высоты 300 м аппроксимируются степенным законом несколько точнее, чем логарифмическим. При сильных ветрах на высоте 200—300 м и устойчивой стратификации атмосферы профили скоростей в слое 200—300 м значительно точнее описываются степенным законом, чем логарифмическим.

Учитывая это, в главе СНиП II-6-74 «Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования» принят степенной закон изменения скоростных напоров по высоте.

Влияние температурной стратификации. С возрастанием скорости ветра увеличиваются ее вертикальные градиенты у самой подстилающей поверхности и происходит усиление вертикального перемешивания между смежными слоями воздуха. Это приводит к росту градиентов скорости не только внизу, но и во всем приземном слое. Влияние стратификации проявляется в усилении или ослаблении вертикального обмена между слоями воздуха. Устойчивость воздушных слоев затрудняет вертикальный обмен, т. е. препятствует выравниванию скоростей по высоте. Поэтому вертикальные градиенты скорости ветра при устойчивой стратификации оказываются большими, чем при неустойчивой. Однако с увеличением скорости ветра различие между ними уменьшается и при некотором достаточно большом значении скорости, вероятно, исчезает совсем.

Отмеченный факт свидетельствует об уменьшении роли стратификации при возрастании скорости ветра.

Шероховатость подстилающей поверхности является одним из основных факторов, влияющих на формирование профилей скорости ветра в пограничном слое атмосферы. Ее влияние на профили легче всего оценить при безразличной стратификации атмосферы, когда эти профили наиболее точно аппроксимируются степенным или логарифмическим законами. Сравнив между собой значения α при безразличной стратификации в пунктах с разной степенью шероховатости подстилающей поверхности, можно получить количественные оценки влияния этой шероховатости на вертикальные профили ветра.

В табл. 5 приведены значения α, вычисленные при безразличной стратификации атмосферы по данным измерений на 14 мачтах, расположенных в местностях с разной подстилающей поверхностью [22].

Из таблицы видно, что значения α меняются в широких пределах; над ровной местностью они существенно меньше, чем над пересеченной и неоднородной. Наибольшее влияние на величину α оказывает непосредственное окружение мачты. Крупные элементы шероховатости, не находящиеся вблизи мачты, заметного влияния на профиль при безразличной стратификации не оказывают.

Для выяснения влияния шероховатости подстилающей поверхности на профиль ветра при больших скоростях у поверхности земли были вычислены зависимости α от скорости на нижнем уровне 200-метрового слоя атмосферы по данным измерений на мачтах в Киеве, Новосибирске, Ленинграде и Обнинске. Высота нижнего уровня измерений была от 24 до 32 м.

Как показал анализ данных измерений, при одной и той же скорости значения α в разных пунктах неодинаковы. Так, при скорости 10 м/с величина α для Киева, где защищенность мачты наибольшая (она окружена 7—8-этажными домами), составляет около 0,3. Наименьшее значение α получилось для Обнинска (около 0,1). Для Ленинграда и Новосибирска, где параметр шероховатости составляет 1—2 м, α составляет около 0,2.

Влияние скорости ветра. В работе [19] приведены данные исследований профилей, выполненных по материалам измерений шести телевизионных и одной высотной метеорологической мачт, расположенных на территории СССР.

Таблица 5

№ п.п.	Название пункта	α	H, м	Местоположение пункта
1	Квикбори (ФРГ)	0,2	2—70	Луг, изгороди из кустарника
2	Нидеррейи (ФРГ)	0,3	3—103	Малоэтажные здания
3	Кельи (ФРГ)	0,34	12,5—90	Город
4	Вуисторф (ФРГ)	0,51	11,5—79	»
5	Науэи (Германия), 1912—1916 гг.	0,12	2—258	Ровная местность
6	Киев (СССР)	0,39 / 0,32	32—180	Центр города, многоэтажные здания
7	Кавагучи (Япония)	0,26	10—312	Рисовые поля, местами сосновые рощи
8	Чедар-Хилл (США)	0,14	9—137	Равнина, травяная растительность
9	Тальмэдж, Огайо (США)	0,2	11—49	Ровная местность
10	Хайфорд, Вашингтон (США)	0,12	15—122	Горная местность
11	Айдахо-Фолс (США)	0,18	6—61	Пустыня
12	Брукхевен (США)	0,29	11—125	Вблизи леса
13	Харуэлл (Англия)	0,08	9—27	Аэродром
14	Обнинск (СССР)	0,15	8—289	В 400 м лес и в 800 м многоэтажные здания

Анализ результатов исследований показывает, что показатель степени α, как правило, уменьшается с усилением ветра у земли. Этот процесс, который происходит во всем диапазоне записанных скоростей ветра, замедляется при больших скоростях.

По данным измерений, проведенных на 150-метровой мачте в Сале (Австралия), установлено, что показатель степени α уменьшается от 0,19 при скорости ветра 10—11 м/с на высоте 12 м до 0,10 при скорости 22 м/с. В Обнинске α уменьшается от 0,5 до 0,10—0,12 при изменении скорости на высоте 8 м от 1 до 10 м/с. При очень сильном ветре у поверхности земли α близко к нулю, т. е. скорость ветра выравнивается по высоте во всем слое.

Вертикальные профили скоростей и скоростных напоров ветра. Для построения таких профилей вводятся следующие типы подстилающей поверхности земли в зависимости от степени ее защищенности:

тип А (местность со слабой защищенностью) — открытая местность (степи, лесостепи, пустыни, открытые побережья морей, озер, водохранилищ);

тип Б (местность с умеренной защищенностью) — лесные массивы, окраины городов и тому подобные местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м;

тип В (местность с сильной защищенностью) — районы крупных городов, имеющие не менее 50% зданий восьми и более этажей.

Для определения профиля средней скорости ветра Давенпорт

предлагает использовать карту скоростей градиентного ветра. Такая карта была построена с учетом шероховатости подстилающей поверхности в районе метеостанции и с использованием соответствующего профиля средней скорости ветра. Средняя скорость на уровне z определяется в этом случае по формуле

$$v(z) = v_G (z/z_G)^{\alpha}, \tag{17}$$

где z_G — градиентная высота; v_G — средняя градиентная скорость.

На основе анализа данных табл. 6—8 Давенпорт в работе [56] рекомендует три вертикальных профиля с показателем степени $\alpha_А = 0{,}16$, $\alpha_Б = 0{,}28$, $\alpha_В = 0{,}40$ и с градиентной высотой z_G, равной соответственно 270 м, 390 м и 510 м. По этим законам определяются скорости ветра до отметки z_G; выше этой отметки скорость принимается постоянной.

В СССР скорости ветра для различных географических районов установлены на основании данных наблюдений, записанных на открыто расположенных метеостанциях, характеризующих ветровой режим вне влияния населенного пункта.

Если принять, что такие станции расположены в местности типа А и принять $\alpha_А = 0{,}16$, то, используя данные табл. 5—8, можно построить вертикальные профили средних скоростных напоров для трех типов подстилающей поверхности земли.

На рис. 6 приведены вертикальные профили средних скоростных напоров, вычисленные по формуле

$$q_{0t}(z) = q_0 k_t(z), \tag{18}$$

$$\text{где } k_t(z) = k_t(10)\left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha_t}, \quad (t = А, Б, В);$$

q_0 — нормативный скоростной напор на уровне 10 м; $\alpha_А = 0{,}16$; $\alpha_Б = 0{,}22$; $\alpha_В = 0{,}33$; $k_А(10) = 1$; $k_Б(10) = 0{,}65$; $k_В(10) = 0{,}30$. $k_t(10)$ определяется из условия равенства на градиентной высоте (где трение воздуха о поверхность не сказывается на его движении) скоростного напора q_{0G} для всех рассматриваемых типов подстилающей поверхности. При градиентной высоте $z_G = 350$ м скоростные напоры $q_{0А}$, $q_{0Б}$, $q_{0В}$ относятся как 1 : 0,65 : 0,3, а скорости $\overline{v}_{10А}$, $\overline{v}_{10Б}$, $\overline{v}_{10В}$ как 1 : 0,81 : 0,55.

Практика проектирования жилых районов со зданиями повышенной этажности (25—30 этажей) в крупных городах СССР потребовала ответа на вопрос о вертикальном профиле скоростного напора для зданий в таких районах, возводимых, как правило, на окраинах городов.

В период строительства отдельные комплексы района, не защищенные соседними зданиями, могут рассматриваться как здания, расположенные в открытой (слабо защищенной) местности (показатель степени в этом случае должен быть принят равным 0,16).

По окончании строительства здания будут находиться в условиях сильной защищенности. В этом случае можно допустить снижение нормативной скорости по сравнению со скоростью в открытой местности на 40—50%. Такое снижение соответствует показателю степени $\alpha = 0{,}33$, нормативный скоростной напор на стандартном уровне $q_{0В} = 0{,}30\, q_{0А}$, где $q_{0А}$ — нормативный скоростной напор для открытой местности.

Профили средних скоростей сильного ветра
земли различной

Н, м

Горо

Ленинград $\alpha=0{,}41$

Нью-Йорк $\alpha=0{,}39$

Копенгаген $\alpha=0{,}38$

Москва $\alpha=0{,}37$

Киев $\alpha=0{,}35$

300 150 60 30 15 6

Лесные массивы, окраины городов

Брукхевен
A) $\alpha=0{,}32$; B) $\alpha=0{,}35$; C) $\alpha=0{,}29$; D) $\alpha=0{,}26$

Квикборн $\alpha=0{,}22$

Оркней $\alpha=0{,}2$

150 60 30 15 6

A B C D

Открытая местность.

Сале $\alpha=0{,}18$

Лиефильд $\alpha=0{,}17$

Саффильд $\alpha=0{,}16$

Энн Арбор $\alpha=0{,}14$

Даллас $\alpha=0{,}13$

150 60 30 15 6

для подстилающей поверхности шероховатости

д а				Лесные массивы окраины городов
Токио $d=0{,}34$	Монреаль $d=0{,}28$	Токио A) $d=0{,}28$ B) $d=0{,}18$ C) $d=0{,}29$ D) $d=0{,}18$	Сан-Луис A) $d=0{,}23$ B) $d=0{,}28$	Фарнборуг $d=0{,}35$
		Открытая местность, берега озер и морей		
Кловис $d=0{,}2$	Сабанан-Ривер $d=0{,}17$	Лондон-Канада $d=0{,}20$	О. Хонсю A) $d=0{,}19$ B) $d=0{,}14$	Лопик $d=0{,}18$
берега озер и морей				
Кардингтон A) $d=0{,}17$; B) $d=0{,}13$		Маснед Сунд $d=0{,}11$	Белли Буниои $d=0{,}11$	Каспийское море $d=0{,}1$

Таблица 7

Показатель степени α для городов

Город	Исследования проводили	Высота на уровне земли, м	Показатель степени	Примечания
Париж	Эйфель	300	0,45	По записям трех ураганов
Ленинград	Арнель и Ключникова	147	0,41	Измерения на башне, центр города
Нью-Йорк	Ратбан	375	0,39	Измерения на высоком здании
Копенгаген	Иенсен	72	0,38	Измерения на башне
Лондон (Великобритания)	Шеллард	180	0,36	То же
Лондон (Канада)	Давенпорт	41	0,36	То же, окраина города
Киев	Ариель и Ключникова	177	0,35	То же, центр города
Токио	Шиотани и Ямамото	60	0,34	Вблизи Королевского дворца
»	Сома	246	0,33	Измерения во время тайфуна, город
Монреаль	—	295	0,28	—
Сент-Луис	—	136	0,25	—

Таблица 8

Скорость ветра 2%-ной обеспеченности в городах и аэропортах

Город	Города			Аэропорты		
	высота анемометра, м	скорость, м/с	скорость, приведенная к стандартному уровню, м/с	высота анемометра, м	скорость, м/с	скорость, приведенная к стандартному уровню, м/с
Бостон	56	32,2	18,2	19	46	41
Нью-Хевен	46	26,8	16,25	13	33	32,2
Чикаго	—	25,6	—	11	31,3	—
Канзас-Сити	54	28,2	16,3	22	42,5	37,4
Омаха	36	29	19	20	40,7	36,4
	33	25,5	17,2	21	39,8	35,4
	57	32,6	18,4	13	38,4	34
	33	22,8	15,4	9	34,9	34,9

Учнтывая сказанное, в Руководстве районы крупиых городов отнесены к местности типа В ($\alpha=0{,}33$).

В табл. 2 приведены коэффициенты $k_i(z)$ для трех типов местностей и для сооружений, расположенных в открытом море ($\alpha=0{,}09$). В последнем случае скоростной напор q_0 определяется по скорости, записанной в районе расположения сооружения.

Проведенные в Главной геофнзической обсерваторин нм. Воейкова исследования [18] показали, что осредненные значения показателя степенн α для местностей типа А, Б, В равны соответственно 0,1, 0,2 и 0,3.

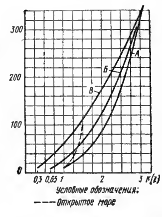


Рис. 6. Вертикальные профили средних скоростных напоров для четырех типов подстилающей поверхности

А — открытые местности (степи, лесостепи, пустыни, открытые побережья морей, озер, водохранилищ);
Б — города, лесные массивы и тому подобные местности высотой более 10 м;
В — районы крупных городов, имеющие не менее 50% зданий восьми и более этажей

Отношение наибольшей за пять лет скорости в умеренно защищенной местности (тип Б) к ее значенню в условиях открытой местности на высоте 10 м над поверхностью земли составляет 0,81—0,85.

Отношение максимальной скорости в районах городов со зданиями повышенной этажности (местность типа В) к максимуму скорости в открытой местности оказалось равным 0,55. Как видно, эти отношения весьма близки к отношениям нормативных скоростей в местности типа Б и А и типа В и А, приведенными выше.

На основании этих исследований можно считать, что рекомендуемые показатели степени для местностей с умеренной и сильной защищенности (типы Б и В) достаточно надежны для построения вертикальных профилей нормативных скоростных напоров.

Вертикальные профили скоростных напоров на границе двух подстилающих поверхностей с различной степенью защищенности. При переходе от открытой местности к окраине города или от окраины к центру города и наоборот профиль скорости для местности, расположенной выше по течению, постепенно приспосабливается к профилю для местности, расположенной ниже по течению. В этом случае на границе двух поверхностей (рис. 7) развивается внутренний пограничный слой, отделяющий режим потока, профиль которого приспособился к поверхности, расположенной ниже по течению, от внешнего потока, который до этой границы не испытывает влияние новой поверхности.

Следуя [79], зависимость между глубиной внутреннего пограничного слоя δ и расстоянием x можно записать в таком виде

$$\frac{\delta}{z_{02}} = C\left(\frac{x}{z_{02}}\right)^{0,8}, \tag{19}$$

где C — медленно меняющаяся функция отношения параметров шероховатости $\frac{z_{02}}{z_{01}}$, $C = 0,75 - 0,03 \ln (z_{02}/z_{01})$. (20)

Значения глубины внутреннего пограничного слоя δ как функции расстояния x приведены в табл. 3 Руководства.

Профили скорости выше и ниже внутреннего пограничного слоя определяются по формулам:

$$\text{при } z > \delta \quad \overline{v(z)} = \frac{v_{\text{т}1}}{k_0} \ln \frac{z}{z_{01}};$$

$$\text{при } z < \delta \quad \overline{v(z)} = \frac{v_{\text{т}2}}{k_0} \ln \frac{z}{z_{02}}, \tag{21}$$

где k_0 — коэффициент сопротивления поверхности, зависящий от средней скорости на стандартном уровне; $v_{\text{т}1}$, $v_{\text{т}2}$ — скорости трения; z_{01}, z_{02} — параметры шероховатости.

На границе раздела $z = \delta$

$$\frac{v_{\text{т}1}}{k} \ln \frac{z}{z_{01}} = \frac{v_{\text{т}2}}{k} \ln \frac{z}{z_{02}}, \text{ откуда } v_{\text{т}2} = v_{\text{т}1} \frac{\ln \frac{\delta}{z_{01}}}{\ln \frac{\delta}{z_{02}}}, \tag{22}$$

где $v_{\text{т}1} = \sqrt{k_0} v_{101}$, где v_{101} — средняя скорость на стандартном уровне.

Значения коэффициентов сопротивления k_0 и параметров шероховатости z_0 приведены в табл. 9.

В случае степенного закона выражения для вертикальных профилей нормативных скоростных напоров приведены в п. 4.2.

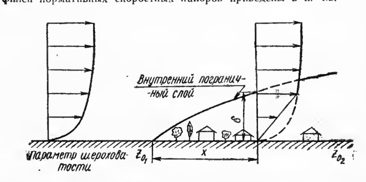


Рис. 7. Вертикальные профили скоростей ветра на границе двух подстилающих поверхностей с различной шероховатостью

Таблица 9

Тип местности	Показатель степени α	Коэффициент сопротивления поверхности k_0	Параметр шероховатости, z_0 м
Открытая местность (тип А)	0,16	0,005	0,01—0,1
Лесистая местность, окраины городов (тип Б)	0,22	0,015	0,2—1
Центры и районы крупных городов со зданиями повышенной этажности	0,33	0,05	1—5

5. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЕТРА НА ВЫСОКИЕ СООРУЖЕНИЯ И ЗДАНИЯ

Вынужденные колебания сооружения при действии турбулентного ветра [2—13, 15, 16, 54—58, 81]. В рассматриваемой задаче следует различать два этапа. Первый этап заключается в преобразовании потока ветра, характеризуемого скоростью $v(z, t)$, в действующие на сооружение возмущающие силы. Это преобразование осуществляется при помощи передаточной функции, зависящей от относительных размеров сооружения и от длин волн — гармоник пульсаций скорости.

Произведение энергетического спектра скорости и квадрата модуля аэродинамической передаточной функции дает спектр возмущающей силы, действующей на сооружение.

Второй этап заключается в преобразовании возбуждения в движение сооружения, осуществляемом при помощи второй передаточной функции, зависящей от собственных частот колебаний сооружения и от суммарного коэффициента диссипации энергии колебаний.

Трудности, возникающие при решении задачи, связаны в основном с оценкой действующих на нее переменных ветровых нагрузок.

В то время как скорость невозмущенного потока и мгновенные давления в различных точках поверхности плохо обтекаемых тел могут быть легко измерены, механизм взаимодействия ветра с сооружением и теоретические зависимости скорости и возмущающих нагрузок изучены еще недостаточно.

По характеру этого взаимодействия сооружения и здания могут быть разбиты на два класса. К первому относятся линейно-протяженные сооружения типа башен, дымовых труб, антенно-мачтовых систем, опор линии электропередачи, технологического оборудования колонного типа, надземных трубопроводов и тому подобные сооружения.

В таких сооружениях характеристические размеры малы по сравнению с длиной волны или поперечными размерами вихрей, поэтому картину обтекания потоком этих элементов можно рассматривать как квазистационарную.

В этом случае аэродинамическая передаточная функция для элементов сооружения будет близка к единице, а спектр скорости легко преобразовывается в спектр аэродинамической силы, при этом используются аэродинамические характеристики элементов сооружения в установившемся потоке.

Ко второму классу относятся протяженные здания, градирни, резервуары и тому подобные пространственные сооружения. Приближенные аэродинамические передаточные функции для этих сооружений могут быть построены на основе модельных или натурных измерений пульсаций давления по поверхности сооружения либо путем использования упрощенных моделей картины обтекания сооружения турбулентным потоком.

Наиболее обоснованное решение задачи для этого класса сооружений можно получить, если заданы пространственно-временные статистические характеристики пульсации давления ветра, вычисленные по данным натурных или модельных испытаний аналогичных сооружений.

Рассмотрим линейно-протяженное сооружение, для которого известны собственные частоты ω_i и собственные формы колебаний $\alpha_i(z)$ $(i=1, 2, ..., s)$.

Давление ветра, действующее на сооружение на уровне z, можно записать в таком виде:

$$q(z,t) = q_{\text{н}}^{\text{c}}(z) + q'(z,t), \tag{23}$$

где $q_{\text{н}}^{\text{c}}(z) = \frac{1}{2}\rho v_{\text{н}}^2(z) c_x(z)$ — нормативное значение статической составляющей давления ветра; $v_{\text{н}}(z)$ — нормативная скорость на уровне z; $q'(z, t) = 2q_{\text{н}}^{\text{c}}(z)[v'(z, t)/v_{\text{н}}(z)]$ — давление ветра, соответствующее пульсационной части скорости $v'(z, t)$; ρ — плотность воздуха; $c_x(z)$ — коэффициент лобового сопротивления сооружения на уровне z.

Перемещения и усилия в системе, вызванные давлением $q_{\text{н}}^{\text{c}}(z)$, легко определяются известными методами теории сооружений.

При рассмотрении динамических реакций (перемещений и усилий) системы целесообразно ввести обобщенные координаты $p_i(t)$, соответствующие полному разделению неизвестных в уравнениях колебаний линейной системы.

Представляя перемещения в виде ряда

$$y(z,t) = \sum_{i=1}^{s} p_i(t)\,\alpha_i(z), \tag{24}$$

получим последовательность уравнений

$$\ddot{p}_i(t) + \gamma\omega_i \dot{p}_i(t) + \omega_i^2 p_i(t) = Q_i(t)/M_i. \tag{25}$$

Здесь обобщенная сила $Q_i(t) = \int_0^{H} q'(z, t)\,\alpha_i(z)\,dz$; обобщенная масса $M_i = \int_0^{H} \mu(z)\,\alpha_i^2(z)\,dz$; $\mu(z)$ — масса единицы высоты сооружения на уровне z; $\gamma = \delta/\pi$; δ — логарифмический декремент колебаний.

Средний квадрат перемещений системы можно записать так:

$$\overline{y^2(z,t)} = \sum_{l=1}^{s} \sum_{l=1}^{s} \alpha_i(z)\, \alpha_l(z)\, \overline{p_i(t)\, p_l(t)}. \qquad (26)$$

Аналогичные выражения можно получить для средних квадратов усилий (изгибающих моментов и поперечных сил), если в формуле (26) $\alpha_i(z)$ и $\alpha_l(z)$ заменить коэффициентами распределения амплитуд изгибающих моментов $\alpha_{Mi}(z)$ и $\alpha_{Ml}(z)$ и поперечных сил $\alpha_{Qi}(z)$ и $\alpha_{Ql}(z)$.

Ковариация обобщенных координат имеет вид

$$\overline{p_i(t) p(t)} = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \Phi_i(i\omega)\, \Phi_l^*(i\omega)\, S_{Q_iQ_l}(\omega)\, d\omega, \qquad (27)$$

где $\Phi_l(i\omega) = \dfrac{1}{M_i\left(-\omega^2 + i\gamma\omega_i\,\omega + \omega_i^2\right)}$; $\Phi_l^*(i\omega) = \Phi_l(-i\omega)$ — передаточные функции, соответствующие частотам i и l; $S_{Q_iQ_l}(\omega)$ — взаимная спектральная плотность обобщенных сил.

Введем безразмерный период $\varepsilon = \dfrac{1}{u} = \dfrac{v_0}{1200n}$. Тогда нормированный энергетический спектр пульсаций продольной компоненты скорости (4) будет иметь вид

$$S_{v'}^{\text{н}}(\varepsilon) = \frac{1200\varepsilon^{5/3}}{3v_0\,(1+\varepsilon^2)^{4/3}}. \qquad (28)$$

Произведение передаточных функций системы $\Phi_i(i\omega)$ и $\Phi_l(-i\omega)$ имеет вид

$$\Phi_i(i\omega)\, \Phi_l(-i\omega) =$$

$$= \frac{\varepsilon^4\left[\varepsilon^4 - \left(\varepsilon_i^2 + \varepsilon_l^2 - \gamma\varepsilon_i\,\varepsilon_l\right)\varepsilon^2 + \varepsilon_i^2\,\varepsilon_l^2\right]}{M_i M_l\,\omega_i^2\,\omega_l^2\left[\varepsilon^4 - 2\left(1 - \dfrac{\gamma^2}{2}\right)\varepsilon_l^2\,\varepsilon^2 + \varepsilon_i^4\right]\left[\varepsilon^4 - 2\left(1 - \gamma^2/2\right)\varepsilon_l^2\,\varepsilon^2 + \varepsilon_l^4\right]} \qquad (29)$$

Выражение для взаимной спектральной плотности обобщенных сил может быть записано в таком виде:

$$S_{Q_iQ_l}(\varepsilon) = \iint^{S} q_{\text{н}}(z_1)\, q_{\text{н}}(z_2)\, \alpha_i(z_1)\, \alpha_l(z_2)\, S_{v'}^{\text{н}}(\varepsilon,\chi)\, dS_1\, dS_2, \qquad (30)$$

где S — поверхность сооружения; χ — расстояние между элементами dS_1 и dS_2 поверхности; $q_{\text{н}}(z) = 2q_{\text{н}}^{\text{c}}(z)\gamma_{\text{т}}(z)$ — нормативное значение давления $q'(z, t)$ на отметке z; z_1 и z_2 — высоты, соответствующие элементам dS_1 и dS_2.

Нормированная взаимная спектральная плотность пульсаций продольной компоненты скорости

$$S_{v'}^{\text{н}}(\chi, \varepsilon) = S_{v'}^{\text{н}}(\varepsilon, z_0)\, R_{v'}(\chi, \varepsilon), \qquad (31)$$

где $S_{v'}^{\text{н}}(\varepsilon, z_0)$ — нормированный энергетический спектр на стандартном уровне, принимаемый по формуле (28).

Коэффициент взаимной корреляции гармоник скоростей (с безразмерным периодом ε)

$$R_{v'}(\chi, \varepsilon) = \exp\left[-\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\chi_x}{60} + \frac{\chi_y}{150} + \frac{\chi_z}{150}\right)\right], \quad (32)$$

где χ_x, χ_y, χ_z — проекции расстояний между рассматриваемыми точками на оси координат, ориентированные таким образом, что ось y совпадает с направлением ветра, а ось z с вертикалью.

Используя формулы (29)—(32) для ковариации обобщенных координат, получим следующее выражение:

$$\overline{p_i(t)\, p_l(t)} = \frac{2}{3M_i\, M_l\, \omega_i^2 \omega_l^2} v_{il}^2, \quad (33)$$

где

$$v_{li}^2 = \int_0^\infty \frac{J(\varepsilon)\, \varepsilon^{11/3}\left[\varepsilon^4 - \left(\varepsilon_i^2 + \varepsilon_l^2 - \gamma\varepsilon_i\, \varepsilon_l\right)\varepsilon^2 + \varepsilon_i^2 \varepsilon_l^2\right] d\varepsilon}{(1+\varepsilon^2)^{4/3}\left[\varepsilon^4 - 2\left(1 - \gamma^2/2\right)\varepsilon_i^2\varepsilon^2 + \varepsilon_i^4\right]\left[\varepsilon^4 - 2 \times\right.} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{}{\left.\times (1 - \gamma^2/2)\, \varepsilon_l^2\, \varepsilon^2 + \varepsilon_l^4\right]}, \quad (34)$$

$$J(\varepsilon) = \iint^S q_{\text{н}}(z_1)\, q_{\text{н}}(z_2)\, \alpha_i(z_1)\, \alpha_l(z_2) \exp\left[-\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\chi_x}{60} + \frac{\chi_y}{150} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{\chi_z}{150}\right)\right] dS_1\, dS_2.$$

Важное значение для рассматриваемых сооружений имеет вопрос об учете высших форм собственных колебаний и взаимной корреляции между ними.

Будем различать в этом классе сооружения башенного типа, обладающие разреженным спектром частот, и сооружения с густым спектром частот собственных колебаний.

В первом случае взаимной корреляцией между собственными формами можно пренебречь [15, 16]. Во многих случаях (п. 6.6 Руководства) для этих сооружений допускается учитывать только первую форму собственных колебаний. Сама динамическая задача о воздействии турбулентного ветра на сооружение башенного типа сводится к квазистатической, т. е. к определению ветровой нагрузки, которая является статическим эквивалентом динамического эффекта, вызываемого пульсациями скоростного напора. Она может быть представлена квазистатической частью, эквивалентной эффекту, вызванному гармониками пульсации скоростного напора, частоты которых достаточно удалены от частоты собственных колебаний сооружения, и «резонансной частью», соответствующей частотам гармоник пульсаций, близким собственной частоте.

Строго говоря, динамическую составляющую ветровой нагрузки следует учитывать при расчете всех зданий и сооружений.

Однако при построении приведенной в главе СНиП II-6-74 методики определения ветровой нагрузки на здания и сооружения было

принято, что для сооружений с периодом собственных колебаний менее 0,25 с и для зданий высотой до 40 м, т. е. для достаточно жестких зданий и сооружений, динамическую составляющую ветровой нагрузки можно не учитывать.

Для указанных зданий и сооружений при сочетании ветровой нагрузки с другими кратковременными нагрузками (снеговой, крановой и др.) и учете вероятности одновременного возникновения расчетных значений пульсации скоростного напора по поверхности сооружения (пространственной корреляции) вклад динамической составляющей ветровой нагрузки мал по сравнению с суммарной расчетной нагрузкой на сооружение.

Для сооружений, имеющих густой спектр собственных частот колебаний, должны учитываться как вклады самих собственных форм колебаний, так и вклады взаимных корреляций между формами. В качестве примера рассмотрим вынужденные колебания горизонтального надземного трубопровода, расчетная модель которого представляет собой пятипролетную неразрезную балку постоянного сечения на жестких опорах. Принимается, что влияние пролетов, расположенных далеко от рассматриваемого, незначительно влияет на его колебания. Параметры расчетной модели: пролет балки $L=50$ м; площадь поперечного сечения — 0,0771 м^2; жесткость на изгиб $EJ=3{,}98\times10^3$ МПам^4; распределенная масса $\mu=2{,}14$ т/м; статическая сжимающая сила — 400 кН.

Нормативное значение давления и интенсивность турбулентности на уровне расположения балки $q^c(x_1)=q^c(x_2)=q^c$; $\gamma_т(x_1)=\gamma_т(x_2)=\gamma_т$. Нормативное значение интенсивности пульсации давления $q_{инт}=2q^c\gamma_т d=0{,}6$ кН/м, где d — диаметр трубопровода.

Известно, что в неразрезных балках собственные частоты образуют зоны сгущения с числом частот в зоне, равном числу пролетов балки. Поскольку первая и вторая зоны сгущения частот в таких балках достаточно удалены друг от друга, динамические перемещения и усилия могут определяться с учетом вклада частот только первой зоны сгущения.

Собственные частоты балки, образующие первую зону сгущения, приведены в табл. 10.

Таблица 10

Номера пролетов	1	2	3	4	5	6
ω_i, рад/с	5,3	5,89	7,39	9,43	11,2	21,4

Ковариации обобщенных координат, вычисленные по формулам (33) и (34), где $J(\varepsilon)=(q_{инт})^2\int\limits_0^L\int \alpha_i(x_1)\alpha_l(x_2)\exp\left(-\frac{|x_1-x_2|}{60\varepsilon}\right)dx_1dx_2$, и увеличенные в 1000 раз, приведены в табл. 11.

Как видно из табл. 11, при определении перемещений и усилий в системе необходимо учитывать вклады всех пяти собственных форм, соответствующих первой зоне сгущения собственных частот неразрезной балки. В то же время вклады взаимных корреляций между собственными формами малы. Это объясняется, по-видимому, тем,

Таблица 11

i	l				
	1	2	3	4	5
1	0,8367	0,0302	0,0209	—0,0076	0,0169
2	—	0,5033	0,018	—0,0142	0,0069
3	—	—	0,1922	—0,0087	0,0144
4	—	—	—	0,0738	—0,0053
5	—	—	—	—	0,0513

что собственные формы неразрезной балки, расположенные в порядке возрастания номеров, попарно чередуясь, симметричны и кососимметричны относительно середины балки.

Ниже общее решение задачи используется для определения динамической составляющей ветровой нагрузки, перемещений и усилий в упомянутых двух классах сооружений и зданий, имеющих разреженный и густой спектр частот собственных колебаний.

Сооружения башенного типа. В качестве расчетной схемы сооружения принимается защемленный в основании консольный стержень переменного сечения по высоте.

Сооружение разбивается на r участков с текущим номером $j=1$, 2, ..., k, ..., m, ..., r, масса участков и действующая на него возмущающая сила сосредоточиваются в центре участка.

Пренебрегая корреляцией между обобщенными координатами, можно средний квадрат смещений точки j системы записать так:

$$\overline{y_j^2(t)} = \sum_{i=1}^{s} \overline{p_i^2(t)}\, \alpha_{ij}^2, \tag{35}$$

где средний квадрат обобщенной координаты

$$\overline{p_i^2(t)} = \int_0^{\infty} |\Phi_i(i\omega)|^2 S_{Q_i}(\omega)\, dx; \tag{36}$$

$$|\Phi_i(i\omega)|^2 = \frac{1}{M_i^2\left[\omega^4 - 2\left(1-\gamma^2/2\right)\omega_i^2\omega^2 + \omega_i^4\right]} \tag{37}$$

— квадрат модули передаточной функции системы;

$$Q_i = \sum_{k=1} Q_k'(t)\,\alpha_{ik}; \quad M_i = \sum_{k=1}^{r} M_k\,\alpha_{ik}^2.$$

Спектральная плотность обобщенной силы

$$S_{Q_i} = \sum_{k=1}^{r}\sum_{m=1}^{r} S_{km}(\omega)\,\alpha_{ik}\,\alpha_{im}, \tag{38}$$

где взаимная спектральная плотность возмущающих сил $Q_k'(t)$ и $Q_m'(t)$;

$$S_{km}(\omega) = 4Q_{нk}^c Q_{нm}^c \gamma_{тk}\gamma_{тm} S_{v^\circ}^{н}\left(z_k, z_m, \omega\right). \tag{39}$$

Возмущающая сила $Q_k^{'}(t) = q_k^{'}(t) S_k$, S_k — площадь проекции сооружения на уровне k на плоскость, перпендикулярную к направлению ветра.

Нормированная взаимная спектральная плотность продольных пульсаций скорости в точках k и m как функция ε будет иметь вид

$$S_{v'}^{\text{н}}\left(z_k, z_m, \varepsilon\right) = \frac{1200\varepsilon^{5/3}}{v_0\, 3\,(1+\varepsilon^2)^{4/3}} \exp\left(-\frac{|z_k - z_m|}{150\varepsilon}\right). \quad (40)$$

Окончательное выражение для среднего квадрата перемещений сооружения запишем так:

$$\overline{y_j^2(t)} = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^{s} \alpha_{ij}^2 \frac{\nu_{ii}^2}{M_i^2 \omega_i^4}, \quad (41)$$

$$\text{где } \nu_{ii}^2 = \int_0^{\infty} \frac{J(\varepsilon)\, \varepsilon^{11/3}\, d\varepsilon}{(1+\varepsilon^2)^{4/3} \left[\varepsilon^4 - 2\left(1 - \gamma^2/2\right) \varepsilon_i^2 \varepsilon^2 + \varepsilon_i^4\right]}; \quad (42)$$

$$J(\varepsilon) = 4 \sum_{k=1}^{r} \sum_{m=1}^{r} Q_{\text{н}k}^{\text{c}} Q_{\text{н}m}^{\text{c}} \gamma_{\text{т}k} \gamma_{\text{т}m} \alpha_i(z_k)\, \alpha_i(z_m) \exp\left(-\frac{|z_k - z_m|}{150\varepsilon}\right). \quad (43)$$

Задача существенно упрощается, если предположить, что скорость ветра полностью коррелирована по высоте сооружения, т. е. представляет собой произведение случайной функции времени на функцию координат.

В этом случае $v_k^{'}(t) = f(t)\sigma_{v_k^{'}}$; $\overline{f(t)} = 0$; $\sigma_f^2 = 1$,

где $\sigma_{v_k^{'}}$ — стандарт пульсации продольной компоненты скорости на уровне k.

Возмущающая сила, действующая на этом уровне,

$$Q_k^{'}(t) = 2Q_{\text{н}k}^{\text{c}} \gamma_{\text{т}k} f(t); \quad (44)$$

стандарт возмущающей силы $\sigma_{Q_k^{'}} = 2Q_{\text{н}k}^{\text{c}} \gamma_{\text{т}k}$.

Расчетное значение возмущающей силы $Q_{\text{р}}^{'}(z_k) = Q_{\text{н}k}^{\text{c}} m(z_k)$, где коэффициент пульсации $m(z_k) = 2\alpha_c\gamma_{\text{т}k}$, α_c — коэффициент обеспеченности.

В главе СНиП II-6-74 интенсивность турбулентности принята по формуле (2). Тогда коэффициенты пульсации для четырех типов подстилающей поверхности могут быть вычислены по формулам:

$$m_{\text{А}k} = 0{,}86\left(\frac{z_k}{10}\right)^{-0{,}16}; \quad m_{\text{Б}k} = 1{,}23\left(\frac{z_k}{10}\right)^{-0{,}22};$$

$$m_{\text{В}k} = 2{,}45\left(\frac{z_k}{10}\right)^{-0{,}33};$$

$$m_{\text{откр.море}\,k} = 0{,}55\left(\frac{z_k}{10}\right)^{-0{,}09}. \quad (45)$$

Как видно, коэффициенты m_{Ak} примерно в два раза больше коэффициентов пульсации, приведенных в СНиП II-А.11-62, что можно объяснить принятыми при анализе пульсации скорости интервалами осреднения (один час и одна-две минуты).

На рис. 8 приведены построенные по экспериментальным данным [23] графики, характеризующие зависимость дисперсии пульсации модуля горизонтальной проекции вектора скорости от интервала осреднения. Учитывая эти данные, коэффициенты пульсации, вычисленные по формулам (45), уменьшены в 1,4 раза:

$$m_{Ak} = 0{,}6\left(\frac{z_k}{10}\right)^{-0{,}16}; \quad m_{Бk} = 0{,}88\left(\frac{z_k}{10}\right)^{-0{,}22};$$

$$m_{Вk} = 1{,}75\left(\frac{z_k}{10}\right)^{-0{,}33};$$

$$m_{\text{откр.море } k} = 0{,}40\left(\frac{z_k}{10}\right)^{-0{,}09}. \qquad (46)$$

Значения коэффициентов m_k приведены в табл. 7 Руководства. При таком подходе средний квадрат смещений j-ой точки сооружения

$$\overline{y_j^2} = \sum_{i=1}^{s} \frac{\eta_{ij}^2\, \xi_i^2}{\omega_i^4}. \qquad (47)$$

Здесь приведенное ускорение $\eta_{ij} = \dfrac{\alpha_{ij}\sum\limits_{i=1}^{r}\sigma_{Q'_k}\alpha_{ik}}{\sum\limits_{k=1}^{r} M_k\,\alpha_{ik}^2}$,

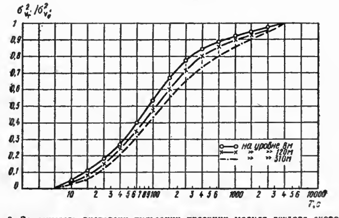


Рис. 8. Зависимость дисперсии пульсации проекции модуля вектора скорости ветра на горизонтальную плоскость от времени усреднения T

$\sigma^2_{v'_0}$ — дисперсия при $T = 4 \cdot 10^3$ с

квадрат коэффициента динамичности

$$\xi_i^2 = \frac{2}{3}\int\limits_0^\infty \frac{\varepsilon^{11/3}\,d\varepsilon}{(1+\varepsilon^2)^{4/3}\left[\varepsilon^4 - 2\left(1-\gamma^2/2\right)\varepsilon_i^2\,\varepsilon^2 + \varepsilon_i^4\right]}. \quad (48)$$

Коэффициент динамичности ξ_i определяется по графикам на рис. 6 Руководства в зависимости от ε_i и от логарифмического декремента колебаний δ.

Такой подход, принятый в изменении 1 к главе СНиП II-А.11-62, сводит рассматриваемую динамическую задачу к квазистатической и позволяет построить удобные формулы для определения динамической составляющей ветровой нагрузки. Он использован и в главе СНиП II-6-74. Корреляция пульсации продольной компоненты скорости учитывается следующим образом.

Рассмотрим сооружение с равномерно распределенной массой и постоянной жесткостью по высоте. Примем для его первой формы собственных колебаний параболу и напишем выражение для отношения средних квадратов обобщенных координат системы с учетом корреляции пульсации скорости по высоте $(\overline{p_1^2(t)})$ и в предположении, что пульсация скорости по высоте полностью коррелирована $(p_1^{*2}(t))$, получим

$$\nu^2 = \overline{p_1^2(t)}/p_1^{*2}(t), \quad (49)$$

где

$$\overline{p_1^2(t)} = \frac{2}{3M_i^2\,\omega_i^4}\int\limits_0^\infty \frac{J(\varepsilon)\,\varepsilon^{11/3}\,d\varepsilon}{(1+\varepsilon^2)^{4/3}\left[\varepsilon^4 - 2\left(1-\gamma^2/2\right)\varepsilon_1^2\,\varepsilon^2 + \varepsilon_1^4\right]}; \quad (50)$$

$$J(\varepsilon) = 4q_н^2(H)\,\gamma_т^2(H)\,H^2\int\limits_0^1\int\limits_0^1 \zeta^{\alpha+2}\zeta_1^{\alpha+2}\exp\left(-\frac{h}{\varepsilon}\left|\zeta-\zeta_1\right|\right)d\zeta d\zeta_1;$$

$$\zeta = \frac{z}{H};\; h = \frac{H}{150}.$$

Чтобы получить $p_1^{*2}(t)$, следует в формуле (50) принять $J(\varepsilon)=1$ и разделить стоящий перед интегралом множитель на $(\alpha+3)^2$. Корень квадратный из отношения (49) представляет собой параметр ν, зависящий от высоты сооружения H, безразмерного параметра ε_1 и логарифмического декремента δ. Средние значения параметра (для $\delta=0{,}15$ и $\delta=0{,}30$) приведены в табл. 8 Руководства.

Теперь можно расчет высокого сооружения башенного типа вести приближенно в предположении, что пульсация скорости полностью коррелирована по высоте. Корреляция продольной пульсации скорости учитывается в этом случае путем введения в формулу для инерционной силы, действующей на j-ую массу при колебаниях сооружения по первой форме, коэффициента ν.

Динамическая составляющая ветровой нагрузки определяется по формуле (9) Руководства. Отметим, что указанная формула

может быть использована только для сооружений башенного типа при учете первой (основной) собственной формы колебаний.

В тех случаях когда для сооружений башенного типа необходим учет высших собственных форм колебаний, коэффициент ν может быть принят равным единице, так как вклад высших собственных форм в таких сооружениях мал по сравнению с вкладом основной собственной формы.

Для сооружений с массой M и ветровой нагрузкой, приведенными к его вершине, $\eta = Q_{\text{н}}^{\text{c}} m/M$. Используя формулу (10) Руководства, получим для динамической составляющей ветровой нагрузки формулу (11).

Для сооружения с равномерно распределенной массой и постоянной по высоте жесткостью определение динамической составляющей ветровой нагрузки при учете только первой формы собственных колебаний можно упростить.

Примем в качестве первой собственной формы колебаний параболу вида $(z/H)^2$. Тогда нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки, действующей на уровне $z - q_{\text{н}}^{\text{д}}(z) = \mu\nu\eta_1(z)\xi_1$.

Приведенное ускорение определяется по формуле

$$\eta_1(z) = \frac{(z/H)^2 \int\limits_0^H (z/H)^2 q_{\text{к}}^{\text{c}}(z)\, m(z)\, dz}{\mu \int\limits_0^H \left(\frac{z}{H}\right)^4 dz} = \frac{5 q_{\text{н}}^{\text{c}}(H)\, m\, (z/H)^2}{\mu\,(3+\alpha_t)}, \quad (51)$$

где $q_{\text{н}}^{\text{c}}(H)$ — статическая составляющая ветровой нагрузки на уровне верха сооружения; m — коэффициент пульсации скоростного напора на том же уровне.

Используя выражение (51), получим $q_{\text{н}}^{\text{д}}(z) = q_{\text{н}}^{\text{c}}(H) \varkappa \nu \xi_1 m$, где коэффициент $\varkappa = \frac{5}{3+\alpha_t}(z/H)^2$. Значение $\varkappa$ для показателя степени $\alpha_t = 0{,}2$ приведено в табл. 9 Руководства.

Одноэтажные производственные здания (при $H > 36$ м и $H/l > 1{,}5$). Для принятой расчетной схемы обобщенная масса

$$M_1 = M + \mu \int\limits_0^H \left(\frac{z}{H}\right)^2 dz = M + \frac{\mu H}{3}; \quad (52)$$

здесь для первой собственной формы колебаний здания принята прямая линия.

Приведенное ускорение на уровне расположения массы покрытия

$$\eta_1(H) = \frac{\frac{1}{H}\int\limits_0^H z q_{\text{н}}^{\text{c}}(z)\, m(z)\, dz}{M + \frac{\mu H}{3}} = \frac{0{,}4\, H q_{\text{н}}^{\text{c}}(H)\, m(H)}{M + \frac{\mu H}{3}}. \quad (53)$$

Используя формулы (9) и (53) Руководства, получим формулу (15) Руководства для динамической составляющей ветровой нагрузки, действующей на массу покрытия.

Высокие здания [8], [57], [81]. Как уже отмечалось, для решетчатых конструкций вследствие малости их элементов обтекающий конструкцию поток может рассматриваться как квазистационарный. В этом случае стандарт лобового сопротивления может быть вычислен в зависимости от его среднего значения c_x от интенсивности турбулентности $\gamma_т$ и от коэффициента поперечной корреляции продольной компоненты скорости

$$R_{v'}(x_1, x_2, n) = e^{-cn|x_1-x_2|/v}, \qquad (54)$$

где $|x_1-x_2|$ — расстояние между точками 1 и 2 по горизонтали.

Тогда для спектральной плотности пульсации лобового сопротивления имеем

$$S_{Q'}(n) = 4\left(\frac{\bar{q}}{v}\right)^2 S_{v'}(n)\, J(n), \qquad (55)$$

где

$$J(n) = \frac{1}{S^2}\iint\limits_{S} \frac{S_{v'_1 v'_2}(n)\, dS_1\, dS_2}{S_{v'}(n)}, \qquad (56)$$

где

$S_{v'_1 v'_2}(n)$ — коспектр (действительная часть взаимной спектральной плотности) пульсации продольной компоненты скорости в точках 1 и 2; S — площадь проекции конструкции на плоскость, перпендикулярную потоку.

Таким образом, если рассматривать здание как решетчатое сооружение, то спектральная плотность возмущающей силы получается путем умножения спектральной плотности пульсация продольной компоненты скорости $S_{v'}(n)$ на функцию $J(n)$, которая представляет собой квадрат модуля аэродинамической передаточной функции здания.

Аэродинамические испытания плохо обтекаемых вертикальных конструкций [81] показали, что использование решетчатой модели допустимо для приближенной оценки пульсации лобового сопротивления зданий малого удлинения в турбулентном потоке. Этот подход, предложенный Викери и Давенпортом [58], эквивалентен допущению, что мгновенная сила, действующая на плохо обтекаемое тело, пропорциональна количеству движения воздуха $\int\limits_S \rho v^2 dS$, протекающего через площадь S. По аналогии с решеткой коэффициент пропорциональности принимается равным $Q/\int\limits_S \rho v^2 dS$, т. е. как для установившегося потока. В дальнейшем этот подход использован нами при определении реакции высокого здания на действие ветра.

Рассмотрим три типа зданий: 1) прямоугольные и квадратные в плане здания с центром жесткости, совпадающим с центром масс; 2) несимметричные в плане здания с центром жесткости, не совпадающим с центром масс; 3) симметричные, протяженные в плане здания типа пластин.

Очевидно, что для зданий первого типа пространственная корреляция продольных пульсаций должна учитываться не только по высоте здания, но и вдоль фасада.

Как и для сооружения башенного типа инерционная сила, приложенная в середине участка при колебаниях здания по i-ой форме, определяется по формуле

$$Q_{ij}^{\text{д}} = M_j \nu \eta_{ij} \xi,$$

где M_j — масса j-го участка, сосредоточенная в его середине; ξ_i — коэффициент динамичности; ν — коэффициент, учитывающий корреляцию пульсации скорости ветра по высоте и фронту здания. Для определения ν^2 используется выражение (50); $\overset{*2}{p_i}(t)$ можно получить, если в указанном выражении принять $J(\varepsilon)=1$ и разделить стоящий перед интегралом множитель на $(\alpha+2)^2$. Выражение для $J(\varepsilon)$ имеет в данном случае вид

$$J(\varepsilon) = 4\left[HBq_{\text{н}}^{\text{c}}(H)\,\gamma_{\text{т}}(H)\right]^2 \int\limits_0^1\!\!\int\!\!\int\!\!\int \zeta^{1+\alpha}\,\zeta_1^{1+\alpha} \exp\left(-\frac{h}{\varepsilon}|\zeta-\zeta_1|\right) \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{2{,}5\,h\lambda}{\varepsilon}|\chi-\chi_1|\right) d\zeta\, d\zeta_1\, d\chi\, d\chi_1. \qquad (57)$$

Здесь коэффициент c в выражении (54) принят равным 20; $\lambda = B/H$; $\chi = x/l$.

Коэффициент ν определяется по табл. 11 в зависимости от высоты здания и параметров $\varepsilon_1 = \dfrac{T_1 v}{1200}$ и λ. Логарифмический декремент колебаний $\delta = 0{,}3$.

Для зданий с равномерно распределенной массой и постоянной по высоте жесткостью коэффициент $\varkappa$ определяется точно так же, как и для сооружений такого типа. Для первой собственной формы колебаний принята прямая линия. Коэффициенты $\varkappa$ приведены в табл. 13 Руководства.

Рассмотрим теперь несимметричное в плане здание рамно-связевой системы (тип 2), в котором центр жесткости не совпадает с центром масс. В таком здании при действии ветра возникают связанные поступательные и вращательные колебания.

Уравнения вынужденных колебаний j-го этажа здания, рассматриваемого как система с s степенями свободы, можно получить из уравнений свободных колебаний здания (п. 7, прил. 2), если в правые части системы уравнений вместо нулей написать возмущающие силы и внешний крутящий момент, действующие на уровне j-го этажа в направлении 1, 2 и 3.

Перемещения точек оси здания могут быть выражены через его собственные формы колебаний

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^{s} p_i(t)\,\alpha_{xi}(z_j);\quad y_j(t) = \sum_{i=1}^{s} p_i(t)\,\alpha_{yi}(z_j);$$

$$\theta_j(t) = \sum_{i=1}^{s} p_i(t)\,\alpha_{\theta i}(z_j), \qquad (58)$$

Здесь $p_i(t)$ — обобщенная координата; $\alpha_{xi}(z_j)$, $\alpha_{yi}(z_j)$, $\alpha_{\theta i}(z_j)$ — ординаты составляющих пространственной формы колебаний здания в точке z_j, соответствующей i-ой собственной частоте.

Обозначим направление движения вдоль осей x и y и поворот вокруг вертикальной оси z соответственно через 1, 2 и 3.

Ось x направлена вдоль наветренной грани, ось y совпадает с направлением ветра. Тогда, используя выражения (58), получим для рассматриваемой линейной системы последовательность уравнений вида (25). Здесь обобщенная сила

$$Q_i(t) = \sum_{k=1}^{r} \alpha_{1ik} Q_{1k}(t) + \sum_{k=1}^{r} \alpha_{2ik} Q_{2k}(t) + \sum_{k=1}^{r} \alpha_{3ik} Q_{3k}(t);$$

обобщенная масса $M_i = \sum_{k=1}^{r} \alpha_{1ik}^2 M_k + \sum_{k=1}^{r} \alpha_{2ik}^2 M_k + \sum_{k=1}^{r} \alpha_{3ik}^2 J_k$,

где M_k и J_k — соответственно масса k-го этажа здания (перекрытия и стен) и момент инерции этой массы относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести здания.

Пусть $\mu = (\sum_{k=1}^{r} M_k)/H$ — масса единицы высоты здания, $J = (\sum_{k=1}^{r} J_k)/H$ — момент инерции массы единицы высоты здания. Примем для составляющих i-ой собственной формы колебаний здания прямую линию и обозначим ординаты составляющих на уровне его верха через k_{1i}, k_{2i}, k_{3i}. Пусть b_{12} — отношение аэродинамических коэффициентов c_t и c_n для заданного направления ветра, e_a — эксцентриситет равнодействующей давления ветра относительно центра наветренной грани, тогда

$$Q_i(t) = 2HB \frac{q(H)}{v(H)} A_i \iint_0^1 \zeta^{1+\alpha} v'(\zeta, \chi, t)\, d\zeta\, d\chi, \tag{59}$$

где

$$A_1 = b_{12} k_{1i} + k_{2i} + k_{3i} e_a;$$
$$M_i = H\left[\mu\left(k_{1i}^2 + k_{2i}^2\right) + J k_{3i}^2\right]/3.$$

В тех случаях когда можно пренебречь связью между поступательными и вращательными колебаниями здания, его собственные формы становятся плоскими с ординатами для верха здания, равными единице. Коварнация обобщенных координат

$$\overline{p_i(t)\, p_l(t)} = \frac{8}{3} \frac{\left[HBq_{\text{н}}^{\text{c}}(H)\, \gamma_{\text{т}}(H)\right]^2 A_i A_l \nu_{il}^2}{M_i M_l \omega_i^2 \omega_l^2}, \tag{60}$$

где ν_{il}^2 определяется по формуле (34); $J(\varepsilon)$ принимается по формуле (57).

Средний квадрат перемещений здания на уровне z_j в направлении 2 определяется по формуле

$$\sigma_{2j}^2 = \sum_{i=1}^{3} \sum_{l=1}^{3} \overline{p_i(t)\, p_l(t)}\, \alpha_{2ij} \alpha_{2lj}. \tag{61}$$

Средние квадраты перемещений здания на этом уровне в направлении 1 и 3 получаются путем замены в коэффициентах распределения амплитуд α_{2ij} и α_{2lj} индекса 2 на 1 и 3.

Формула (61) учитывает первые три низшие собственные частоты здания, соответствующие его поступательным и вращательным колебаниям.

Интенсивность инерционной силы (динамическая составляющая ветровой нагрузки) в направлении 2 и возмущающий крутящий момент на единицу высоты здания, действующие на уровне z, будут иметь вид:

$$q_2^{\text{д}}(z, t) = \frac{\mu z}{H} \sum_{i=1}^{s} \omega_i^2 k_{2i} p_i(t);$$

$$M_{\text{кр}}^{\text{д}}(z, t) = \frac{Jz}{H} \sum_{i=1}^{s} \omega_i^2 k_{3i} p_i(t).$$

Средний квадрат интенсивности инерционной силы

$$\sigma_q^2 = \frac{\mu^2 z^2}{H^2} \sum_{i=1}^{s} \sum_{l=1}^{s} \omega_i^2 \omega_l^2 k_{2i} k_{2l} \overline{p_i(t) p_l(t)}. \quad (62)$$

Средний квадрат возмущающего крутящего момента

$$\sigma_{M\text{кр}}^2 = \frac{J^2 z^2}{H^2} \sum_{i=1}^{s} \sum_{l=1}^{s} \omega_i^2 \omega_l^2 k_{3i} k_{3l} \overline{p_i(t) p_l(t)}. \quad (63)$$

Используя формулы (62) и (63), были получены приведенные в Руководстве формула (16) для расчетного значения перемещения на уровне z и формулы (17) и (19) для нормативных значений динамической составляющей ветровой нагрузки и возмущающего крутящего момента.

Для протяженных высоких зданий типа пластин (тип 3) с центром жесткости, совпадающим с центром масс, учитываются только две собственные формы колебаний здания, соответствующие его поперечным поступательным и вращательным колебаниям (направления 2 и 3).

В таких зданиях $A_1 = k_{11} = 1$; $A_2 = k_{22} = 1$; $A_3 = k_{33} e_a$. Если для здания определена кососимметричная форма колебаний, то $k_{33} = 1/B$, где B — расстояние между крайними диафрагмами (длина наветренной грани здания).

Перемещение крайней диафрагмы в таком здании вдоль оси z (направление 2) на уровне z

$$y_{\text{к}}(z, t) = y(z, t) + \frac{B\theta(z, t)}{2}. \quad (64)$$

Здесь $y(z, t)$ — перемещение центра тяжести здания на этом уровне; $\theta(z, t)$ — угол поворота массы здания вокруг вертикальной оси z.

При учете только одной собственной формы колебаний в направлении y и θ (2 и 3) получим

$$y_{\kappa}(z, t) = \frac{z}{H}\left[k_{22}\,p_2(t) + \frac{Bk_{33}\,p_3(t)}{2}\right];$$

стандарт перемещения

$$\sigma(z) = \frac{z}{H}\left[k_{22}^2\,\overline{p_2^2(t)} + Bk_{22}\,k_{33}\,\overline{p_2(t)\;p_3(t)} + \frac{B^2\,k_{33}^2\,\overline{p_3^2(t)}}{4}\right]^{1/2}. \qquad (65)$$

Формулы для расчетного значения перемещения крайней диафрагмы здания на уровне z и действующей на эту диафрагму нормативного значения интенсивности инерционной силы приведены в п. 6.20 Руководства. Там же дана формула для определения нормативного значения возмущающего крутящего момента на уровне z.

Конструкционное демпфирование. Известно, что правильное определение коэффициента диссипации энергии колебаний $\gamma_{сумм}$ высокого сооружения имеет существенное значение при оценке расчетных амплитуд и усилий в сооружении.

Коэффициент $\gamma_{сумм}$ обусловлен внутренним трением в соединениях и в материале сооружения (конструкционным демпфированием) и аэродинамическим демпфированием, вызванным движением сооружения в потоке сильного ветра,

$$\gamma_{сумм} = \gamma_k + \gamma_a.$$

Коэффициент диссипации при действии сил внутреннего трения $\gamma_k = \delta/\pi$ (где δ — логарифмический декремент колебаний) зависит от вида напряженного состояния при колебаниях, от амплитуды динамического напряжения, от статического напряжения, от частоты колебаний и от числа циклов колебаний.

Принятые в главе СНиП II-6-74 логарифмические декременты колебаний для стальных мачт, башен и дымовых труб установлены на основании экспериментальных данных (табл. 12.)

Таблица 12

$\delta_{сумм}$, $\delta_{к}$	Сооружение, его частота n, начальная амплитуда a, скорость ветра v_0			
	Башня (по Давенпорту) $n = 0{,}8$ Гц, $v_0 = 16$ м/с	Мачта (по Давенпорту) $n = 0{,}3$ Гц, $v_0 = 9$ м/с	Башни (по Сысоеву В. И.) $n = 0{,}8$ Гц, $a = 220$ мм	Дымовая труба (по Барштейну М. Ф.) $n = 0{,}6$ Гц, $a = 220$ мм
Суммарный логарифмический декремент колебаний (при ветре)	0,11—0,14	0,12—0,145	—	—
Логарифмический декремент колебаний δ_k, соответствующий конструкционному демпфированию (без ветра)	0,06—0,1	0,03—0,05	0,12	0,125

Как видно, экспериментальное значение логарифмического декремента колебаний для стальных сооружений при амплитудах, близких к расчетным, составляет примерно 0,12, а с учетом аэродинамического демпфирования $\approx 0{,}15$, т. е. соответствует принятому логарифмическому декременту колебаний для стальных сооружений.

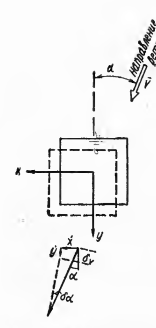


Рис. 9. Приращения угла атаки и относительной скорости ветра

Для отдельных элементов стальных сооружений, а также для гибких сварных конструкций в случае резонанса при расчете в направлении действия ветра δ принято равным 0,05, и это значение соответствует значению логарифмического декремента таких конструкций, установленному экспериментально.

Для железобетонных сооружений δ принят равным 0,3. Это значение соответствует расчетным амплитудам сооружения.

Отметим, что рекомендуемые в зарубежной литературе логарифмические декременты колебаний соответствуют, как правило, малым амплитудам. Приведенные в главе СНиП II-6-74 расчетные значения соответствуют суммарному коэффициенту диссипации энергии $\gamma_{сумм}$ и только для стальных сооружений цилиндрической формы в случае ветрового резонанса, связанного с аэродинамической (эоловой) неустойчивостью, которая возникает при критической скорости ветра, когда аэродинамическое демпфирование снижает $\gamma_{сумм}$, его расчетное значение вместо 0,15 принято равным 0,05—0,1.

Аэродинамическое демпфирование в направлении действия ветра [55]. Когда сооружение колеблется в потоке ветра, его относительная скорость изменяется как по величине, так и по направлению. Пусть $\delta\alpha$ и δv приращения угла атаки и относительной скорости; $F(\alpha, \bar{v}) = \frac{1}{2}\rho \bar{v}^2 c_F(\alpha) d$ — аэродинамическая сила. Тогда приращение

$$\delta F = \frac{dF}{d\alpha}\delta\alpha + \frac{dF}{d\bar{v}}\delta v = \frac{1}{2}\rho \bar{v}^2 d\left(2c_F\frac{\delta v}{\bar{v}} + \frac{dc_F}{d\alpha}\delta\alpha\right), \qquad (66)$$

где $\delta v = -\dot{x}\sin\alpha - \dot{y}\cos\alpha$; $\delta\alpha = -\frac{1}{\bar{v}}(\dot{x}\cos\alpha - \dot{y}\sin\alpha)$ (рис. 9),

$\dot{x}$ и $\dot{y}$ — скорости колебаний сооружения в направлении осей x и y; d — характеристический размер сооружения.

Проекции δF на оси x и y

$$\delta F_x = \frac{1}{2}\rho \bar{v}^2 d\left(\left\{-2c_{F_x}\sin\alpha - \frac{dc_{F_x}}{d\alpha}\cos\alpha\right\}\frac{\dot{x}}{\bar{v}} + \left[-2c_{F_x}\cos\alpha + \frac{dc_{F_x}}{d\alpha}\sin\alpha\right]\frac{\dot{y}}{\bar{v}}\right),$$

$$\delta F_y = \frac{1}{2}\rho \bar{v}^2 d\left(\left\{-2c_{F_y}\cos\alpha + \frac{dc_{F_y}}{d\alpha}\sin\alpha\right\}\frac{\dot{y}}{\bar{v}} + \left[-2c_{F_y}\sin\alpha - \frac{dc_{F_y}}{d\alpha}\cos\alpha\right]\frac{\dot{x}}{\bar{v}}\right). \quad (67)$$

Силы в фигурных скобках с противоположными знаками — силы аэродинамического демпфирования; силы в квадратных скобках — силы взаимодействия между колебаниями в направлении x и y.

Если собственные частоты колебаний в обоих направлениях достаточно удалены друг от друга, то силами взаимодействия можно пренебречь. В этом случае обобщенную силу аэродинамического демпфирования можно записать так:

$$C_{ax} = \int_0^1 \delta F_x(\zeta)\,\alpha^2(\zeta)\,d\zeta, \quad \left(\zeta = \frac{z}{H}\right), \quad (68)$$

где для $\delta F_x(\zeta)$ учитывается в формуле (67) только выражение в фигурных скобках.

Используя известное соотношение между логарифмическим декрементом колебаний δ_a и критическим затуханием $C_{a\,кр}$, получим:

$$\delta_{ax} = \frac{2\pi C_{ax}}{C_{aкр}} = \frac{\rho_a v_0}{4\,\bar{\rho}_{сооруж}\, n_1 d} D(x);$$

$$\delta_{ay} = \frac{2\pi C_{ay}}{C_{a\,кр}} = \frac{\rho_a v_0}{4\,\bar{\rho}_{сооруж} n_1\, d} D(y). \quad (69)$$

$$D(x) = \int_0^1 \frac{v(\zeta)}{v_0}\left(2c_{F_x}\sin\alpha + \frac{dc_{F_x}}{d\alpha}\cos\alpha\right)\alpha^2(\zeta)\,d\zeta;$$

$$D(y) = \int_0^1 \frac{v(\zeta)}{v_0}\left(2c_{F_y}\cos\alpha - \frac{dc_{F_y}}{d\alpha}\sin\alpha\right)\alpha^2(\zeta)\,d\zeta, \quad (70)$$

$v(\zeta)$ и v_0 — нормативные скорости на уровнях ζ и стандартном.

Из указанного следует, что силы аэродинамического демпфирования пропорциональны отношению плотности воздуха ρ_a к средней плотности сооружения $\bar{\rho}$ и приведенной частоте $n_1 d/v_0$.

Интегралы $D(x)$ и $D(y)$ — постоянные параметры, зависящие от собственной формы колебаний сооружения и от аэродинамических коэффициентов, определяемых по измерениям в установившемся потоке. При колебаниях в направлении ветра эти силы препятствуют движению. Явления аэродинамической неустойчивости, связанные с колебаниями сооружения поперек потока, рассмотрены в п. 6 данного приложения.

Допустимые ускорения колебаний здания. В высоких зданиях при действии ветра могут возникнуть колебания, вызывающие дискомфорт живущих в них людей. Реакция человека на эти колебания определяется такими факторами, как положение тела, направление и продолжительность колебаний, характер человека, окружение и т. д.

В последние два десятилетия было проведено много исследований, целью которых было выяснить, какие кинематические элементы движения (перемещение, скорость, ускорение, скорость изменения ускорения) оказывают решающее влияние на восприятие человеком колебаний и их предельные значения.

Было установлено, что при низкочастотных колебаниях в качестве критерия оценки действия колебаний на людей может быть принято ускорение. Некоторые исследователи считают, что при частотах от 1 до 6 Гц скорость изменения ускорения в большей степени является причиной дискомфорта, нежели само ускорение.

Известно, что все полученные до настоящего времени экспериментальные данные относятся к колебаниям с частотой более 1 Гц и с амплитудами не более 1 мм. Для высоких зданий с периодом колебаний порядка 1—8 с этот вопрос был рассмотрен Чангом [61], который экстраполировал экспериментальные данные, полученные для высоких частот в области более низких частот (1—0,1 Гц), и установил предельные ускорения колебаний и характеристики их воздействия на людей (рис. 8 Руководства).

Антенно-мачтовые сооружения [9, 11, 12, 13]. Такие сооружения являются пространственными системами, состоящими из ряда мачт, связанных горизонтальными вантами и антенными полотнами (рис. 10). Антенное полотно представляет собой плоскую сеть, состоящую из контурного леера и горизонтальных и вертикальных элементов, которые крепятся к его боковым сторонам. Контурный леер подвешивается к рее, которая через гибкие подвески крепится к верху мачты. Каждая мачта поддерживается несколькими ярусами вант.

Ветер действует нормально к плоскости антенного полотна. В этом случае антенно-мачтовое сооружение разбивается на элементы сравнительно простой геометрической структуры (отдельные мачты, антенные полотна, ванты). Пространственная корреляция пульсации продольной компоненты скорости ветра учитывается только при вычислении нагрузки на отдельный элемент системы. Пространственная корреляция пульсации скорости между отдельными элементами не учитывается.

Ветровая нагрузка на антенное полотно определяется в квазистатической постановке. Это значит, что при расчете полотна кроме статической составляющей ветровой нагрузки учитывается также действующая статически составляющая ветровой нагрузки, соответствующая пульсации продольной компоненты скорости. Эту составляющую ветровой нагрузки будем в дальнейшем называть пульсационной.

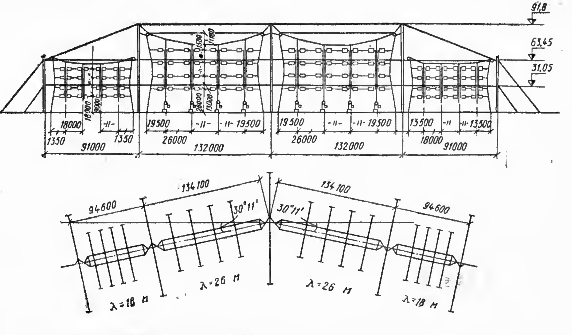


Рис. 10. Схема антенно-мачтового сооружения

Ветровая нагрузка на горизонтальный элемент полотна. Интенсивность ветровой нагрузки на элемент можно записать в таком виде:

$$q_{\text{инт}}(z_1, x, t) = q^{\text{c}}_{\text{инт}}(z_1) + q'_{\text{инт}}(z_1, x, t), \qquad (71)$$

где $q^{\text{c}}_{\text{инт}}(z_1)$ — интенсивность статической составляющей ветровой нагрузки; $q'_{\text{инт}}(z_1, x, t) = 2q^{\text{c}}_{\text{инт}}(z_1)\dfrac{v'(z_1, x, t)}{v(z_1)}$ — интенсивность пульсационной составляющей ветровой нагрузки.

Пульсационная составляющая ветровой нагрузки на элемент

$$Q'(z_1 t) = \int_0^L q'_{\text{инт}}(z_1, x, t)\,dx = \frac{2q^{\text{c}}_{\text{инт}}(z_1)}{v(z_1)}\int_0^L v'(z_1, x, t)\,dx. \qquad (72)$$

Среднее значение $\overline{Q'(z_1)} = 0$; средний квадрат пульсационной составляющей ветровой нагрузки

$$\overline{Q'^2}(z_1) = 4\frac{\left[q^{\text{c}}_{\text{инт}}(z_1)\right]^2}{v^2(z_1)}\iint_0^L \overline{v'(z_1, x, t)\,v'(z_1, x', t)}\,dx\,dx'. \qquad (73)$$

Ковариация пульсационной составляющей скорости в точке x и x'

$$\overline{v'(z_1, x, t)\,v'(z_1, x', t)} = 2\int_0^\infty S_{v'}(x, x', n)\,dn =$$

$$= 2\int_0^\infty S_{v'}(n)\exp\left(-\frac{20n\,|x - x'|}{v_0}\right)dn, \qquad (74)$$

здесь $S_{v'}(n)$ — энергетический спектр пульсации продольной компоненты скорости;

$$R_{v'}(n, x, x') = \exp\left(-\frac{20n\,|x - x'|}{v_0}\right)$$

— коэффициент пространственной корреляции пульсации скорости.

Откуда $$\overline{Q'^2}(z_1) = \frac{8}{3}\,\frac{\left[q^{\text{c}}_{\text{инт}}(z_1)\right]^2}{v^2(z_1)}\,\sigma^2_{v'}\int_0^\infty\iint_0^L \frac{u\exp\left(-\dfrac{|x-x'|u}{60}\right)du\,dx\,dx'}{(1+u^2)^{4/3}}; \qquad (75$$

двойной интеграл

$$\iint_0^L \exp\left(-\frac{|x - x'|u}{60}\right)dx\,dx' = L^2\frac{2}{c^2}(c + e^{-c} - 1) \approx L^2\left(\frac{1}{1 + c/2}\right),$$

где $c = uL/60$; $u = 1200\,n/v_0$;

стандарт пульсационной составляющей ветровой нагрузки

$$\sigma_{Q^\bullet}(z') = \frac{q^{c}_{\text{инт}}(z_1)}{v(z_1)} \sigma_{v'} L\nu(L), \tag{76}$$

где $\nu(L) = \left(\frac{2}{3} \int\limits_0^\infty \frac{u du}{(1+u^2)^{4/3}(1+uL/120)} \right)^{1/2}$ — коэффициент пространственной корреляции пульсационной составляющей интенсивности ветровой нагрузки, принимаемый по табл. 15 Руководства.

Нормативное значение пульсационной составляющей интенсивности ветровой нагрузки, распределенной по горизонтальному элементу полотна,

$$q'_{\text{инт.н}}(z_1) = \alpha_c \sigma_{q^\bullet_{\text{инт}}} = q^{c}_{\text{инт.н}}(z_1)\, m(z_1)\, \nu(L). \tag{77}$$

Нормативное значение интенсивности ветровой нагрузки на горизонтальный элемент полотна и на горизонтальные ванты определяется по формуле (22) п. 6.23 Руководства.

Ветровая нагрузка на антенное полотно. Пульсационная составляющая ветровой нагрузки на полотно можно записать в таком виде:

$$Q^\bullet_{\text{полотна}}(z, x, t) = \int\limits_0^L \int\limits_0^H q'(z, x, t)\, dx\, dz =$$

$$= \frac{2q^c(10)}{v_0} \int\limits_0^L \int\limits_0^H \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha_A} v'(z, x, t)\, dx\, dz \tag{78}$$

$$\overline{Q'_{\text{полотна}}} = 0; \; \overline{Q'^2} = \frac{4\,[q^c(10)]^2}{v_0^2} \iint\limits_0^L \iint\limits_0^H \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha_A} \left(\frac{z'}{10}\right)^{\alpha_A} \times$$

$$\times \overline{v'(z, x, t)\, v'(z', x', t)}\, dx\, dx'\, dz\, dz', \tag{79}$$

где $\alpha_A = 0{,}16$ — показатель степени, характеризующий изменение скоростного напора по высоте полотна.

По аналогии с (74) ковариацию пульсационной составляющей скорости x и x', z и z' запишем в таком виде:

$$\overline{v'(z, x, t)\, v'(z', x', t)} = 2 \int\limits_0^\infty S_{v'}(n) \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{20\,|x - x'|\,n}{v_0}\right) \exp\left(-\frac{8\,|z - z'|\,n}{v_0}\right) dn. \tag{80}$$

Примем $z = \zeta H$, $x = \chi L$, тогда

$$\overline{Q'^2_{\text{полотна}}} = 4\left(q^c_{\text{н}}(H)\right)^2 \gamma_z^2(H)\, S^2 \nu_1^2, \; (S = HL). \tag{81}$$

Здесь коэффициент пространственной корреляции пульсационной составляющей ветровой нагрузки

$$\nu_1 = \left(\frac{2}{3} \int_0^1 \int_0^1 \int_0^\infty \frac{u}{(1+u^2)^{4/3}\left(1+\frac{uL}{120}\right)} \zeta^{\alpha_A} \zeta'^{\alpha_A} \times \right.$$

$$\left. \times \exp\left(-\frac{|\zeta-\zeta'|\,Hu}{150}\right) d\zeta\, d\zeta'\, du \right)^{1/2}. \quad (82)$$

Значения ν_1 приведены в табл. 16 Руководства. Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки, распределенной по полотну,

$$q_н = q_н^с (H)\, m(H)\, \nu_1. \quad (83)$$

Нормативное значение ветровой нагрузки, распределенной по полотну, определяется по формуле (24) Руководства.

Ветер действует в плоскости антенного полотна. В этом случае антенно-мачтовое сооружение разбивается на цепочку связанных между собой мачт и на антенное полотно.

Ветровую нагрузку на вертикальные элементы полотна и на систему от вант мачт цепочки рекомендуется определять в квазистатической постановке. Пространственная корреляция пульсации продольной компоненты скорости для этих элементов учитывается по высоте системы и по направлению и поперек потока ветра.

Ветровая нагрузка на вертикальные элементы антенного полотна. Если в антенном полотне s вертикальных элементов, то пульсационную составляющую ветровой нагрузки на полотно можно записать в таком виде:

$$Q'_{полотна}(t) = \sum_{i=1}^{s} \int_0^H q'(x_i, z, t)\, dz =$$

$$= \frac{2q^с_{инт.н}(10)}{v_0} \sum_{i=1}^{s} \int_0^H \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha_A} v'(z, x_i, t)\, dz, \quad (84)$$

где $q^с_{инт.н}(10) = q_0 c_{x\,пров} d_э$; q_0 — интенсивность ветровой нагрузки на вертикальный элемент на уровне 10 м.

Средний квадрат

$$\overline{Q'^2} = \frac{4[q^с_{инт.н}(10)]^2}{v_0^2} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{s} \iint_0^H \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha_A} \left(\frac{z'}{10}\right)^{\alpha_A} \times$$

$$\times \overline{v'(z, x_i, t)\, v'(z', x_j, t)}\, dz dz'. \quad (85)$$

Ковариация пульсации продольной компоненты в точках z и z', x_i и x_j имеет вид

$$\overline{v'(z, x_i, t)\, v'(z', x_j, t)} = 2 \int_0^\infty S_{v'}(n) \exp\left(-\frac{8|z-z'|\,n}{v_0}\right) \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{8\,|x_i - x_j|\,n}{v_0}\right) dn, \tag{86}$$

$$\overline{Q'^2} = 4\left[q^{c}_{\text{инт.н}}(H)\right]^2 \gamma_{\text{т}}^2(H)\, H^2 \nu_2^2. \tag{87}$$

Нормативное значение интенсивности пульсационной составляющей ветровой нагрузки, действующей в плоскости полотна,

$$q'_{\text{инт.н}} = q^{\text{c}}_{\text{инт.н}}(H)\, m(H)\, \nu_2, \tag{88}$$

где

$$\nu_2 = \left[\frac{2}{3}\int_0^1\!\!\int_0^1\!\!\int_0^\infty \frac{u}{(1+u^2)^{4/3}}\, \zeta^{\alpha_{\text{A}}} \zeta'^{\alpha_{\text{A}}} \exp\left(-\frac{|\zeta - \zeta'|\,Hu}{150}\right) \times \right.$$

$$\left. \times \sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{s} \exp\left(-\frac{|\chi_i - \chi_j|\,Lu}{150}\right) d\zeta\, d\zeta'\, du\right]^{1/2}.$$

Значение коэффициентов пространственной корреляции ν_2 приведены в табл. 17 Руководства.

Нормативное значение интенсивности ветровой нагрузки на вертикальные элементы определяется по формуле (25) Руководства.

Ветровая нагрузка на систему от вант цепочки мачт. Пульсационная составляющая ветровой нагрузки на систему от вант цепочки мачт

$$R'(t) = \sum_{i=1}^{k}\sum_{m=1}^{r} R'_{mi}(t), \tag{89}$$

где $R'_{mi}(t)$ — пульсационная составляющая реакции вант яруса m i-ой мачты; m — номер яруса мачты; r — число ярусов; k — число мачт цепочки.

Среднее значение $R'_{mi}(t) = 0$; средний квадрат пульсационной составляющей ветровой нагрузки на систему от вант цепочки

$$\overline{R'^2} = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{k}\sum_{m=1}^{r}\sum_{l=1}^{r} \overline{R'_{mi}(t)\, R'_{lj}(t)}. \tag{90}$$

Ковариация реакции вант мачт

$$\overline{R'_{mi}(t)\, R'_{lj}(t)} = \frac{2}{h_m h_l}\int_0^{h_m}\!\!\int_0^{h_l} \overline{\left[q'_{\text{инт.л}m}(z, x_i, y, t)\, q'_{\text{инт.п}l}(z', x_j, y', t) + \right.}$$

$$\overline{\left. + q'_{\text{инт.п}m}(z, x_i, y, t)\, q'_{\text{инт.л}l}(z', x_j, y', t)\right]}\, zz'\, dz\, dz'. \tag{91}$$

Здесь $q'_{\text{инт.л}m}(z, x_i, y, t)$ и $q'_{\text{инт.п}l}(z', x_j, y', t)$ — интенсивность пульсационной составляющей ветровой нагрузки на левую и правую ванты m-го и l-го ярусов i-ой и j-ой мачт; h_m и h_l — высоты m-го и l-го ярусов.

Ковариации интенсивности пульсационной составляющей ветровой нагрузки

$$\overline{q'_{\text{инт.лm}}(z, x_i, y, t)\, q'_{\text{инт.лl}}(z', x_j, y', t)} =$$
$$= \frac{4\left[q^{\text{c}}_{\text{инт.н}}(10)\right]^2}{v_0^2}\left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha_A}\left(\frac{z'}{10}\right)^{\alpha_A}\overline{v'_{\text{лm}}(z, x_i, y, t)\, v'_{\text{лl}}(z', x_j, y', t)},$$
$$\overline{q'_{\text{инт.пm}}(z, x_i, y, t)\, q'_{\text{инт.лl}}(z', x_j, y', t)} = \tag{92}$$
$$= \frac{4\left[q^{\text{c}}_{\text{инт.н}}(10)\right]^2}{v_0^2}\left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha_A}\left(\frac{z'}{10}\right)^{\alpha_A}\overline{v'_{\text{пm}}(z, x_i, y, t)\, v'_{\text{лl}}(z', x_j, y', t)}.$$

Ковариации пульсации продольной компоненты скорости в точках x_i, y, z и x_j, y', z'

$$\overline{v'_{\text{лm}}(z, x_i, y, t)\, v'_{\text{лl}}(z', x_j, y', t)} = 2\int_0^\infty S_{v'}(n)\exp\left(-\frac{8|z-z'|\,n}{v_0} - \frac{20\,|h_l - h_m + z - z'|\,n}{v_0} - \frac{8\,|x_i - x_j|\,n}{v_0}\right)dn; \tag{93}$$

$$\overline{v'_{\text{пm}}(z, x_i, y, t)\, v'_{\text{лl}}(z', x_j, y', t)} = 2\int_0^\infty S_{v'}(n)\exp\left(-\frac{8|z-z'|\,n}{v_0} - \frac{20\,|h_m + h_l - z - z'|\,n}{v_0} - \frac{8\,|x_i - x_j|\,n}{v_0}\right)dn.$$

Если принять $h_l = lh_1$; $h_m = mh_1$, где h_1 — высота первого яруса, $z = \zeta_m h_1$; $z' = \zeta' l h_1$; $x_i = \chi_i L$; $x_j = \chi_j L$; $y = mh_1(1-\zeta)$; $y' = lh_1(1-\zeta')$; $L_c = (k-1)\,l_м$ — длина системы, $l_м$ — расстояние между мачтами и учесть данные формул (91)—(93), то выражение (90) можно записать в таком виде:

$$\overline{R'^2} = \frac{16}{3}\left[q^{\text{c}}_{\text{инт.н}}(h_1)\,\gamma_{\text{т}}(h_1)\,h_1\right]^2\int_0^\infty \frac{uC(u)\,D(u)}{(1+u^2)^{4/3}}\,du, \tag{94}$$

где

$$C(u) = \sum_{m=1}^{k}\sum_{l=1}^{k}\int_0^1\!\!\int m^{1+\alpha_A}\, l^{1+\alpha_A}\left[\exp\left(-\frac{|m\zeta - l\zeta'|\,h_1 u}{150} - \frac{|l - m + m\zeta - l\zeta'|\,h_1 u}{60}\right) + \exp\left(-\frac{|m\zeta - l\zeta'|\,h_1 u}{150} - \frac{|m + l - m\zeta - l\zeta'|\,h_1 u}{60}\right)\right]\zeta^{1+\alpha_A}\,\zeta'^{\,1+\alpha_A}\,d\zeta\,d\zeta';$$

$$D(u) = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{k}\exp\left(-\frac{|\chi_i - \chi_j|\,L_c u}{150}\right); \quad (\alpha_A = 0{,}16). \tag{95}$$

Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки на систему от вант цепочки мачт определяется по формуле (28) Руководства, где коэффициент пространственной корреляции для системы

$$\nu_c = \left(\frac{4}{3} \int_0^{\infty} \frac{uC(u)\, D(u)\, du}{(1+u^2)^{4/3}} \right)^{1/2}. \tag{96}$$

Статический расчет мачты. Вопросы статического расчета мачт исследованы в настоящее время достаточно подробно [36, 38, 41, 42]. Разработана программа, позволяющая рассчитывать многоярусные мачты с учетом геометрической нелинейности вант и нормальных сил в стволе.

Эта программа реализует алгоритм, согласно которому нелинейная система, моделирующая мачту, рассчитывается методом последовательных приближений. Линейная система, получающаяся на каждом этапе последовательных приближений, исследуется методом сил.

В этом пункте для статического расчета мачт используется метод перемещений.

При построении алгоритма расчета принято, что направления реакций и смещений узлов мачты совпадают. В этом случае плоскости деформирования ствола и вант будут совпадать с плоскостью нагрузки.

Учитывается изгиб ствола в плоскости, перпендикулярной плоскости действия ветра. В соответствии с этим в основной системе помимо связей, препятствующих линейным горизонтальным смещениям и поворотам узлов в плоскости действия ветра, вводятся аналогичные связи в плоскости zOX.

При определении нагрузки на ванту учитывается только ее составляющая, перпендикулярная хорде. Пусть плоскость действия ветра и j-ой ванты k-го яруса образуют угол φ_j, угол наклона ванты к горизонту α_j, θ_j — угол, образованный направлением ветра и вантой, тогда составляющая суммарной интенсивности статической нагрузки, нормальная к ванте, определяется по формуле (27) Руководства.

Нормальная составляющая веса, гололеда или эквивалентной нагрузки на единицу длины ванты g_n лежит в плоскости ванты. Интенсивность статической составляющей ветровой нагрузки

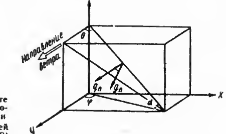


Рис. 11. Нормальные к ванте составляющие ее веса и гололеда g_n и интенсивности статической составляющей ветровой нагрузки $q_n(z,\ \theta)$

$q_n(z, \theta)$, нормальной к ванте, лежит в плоскости, образованной вантой и направлением ветра (рис. 11). $\cos[g_n, q_n(z, \theta]$ определяется по формуле, приведенной в п. 6.28.

Как известно [41], натяжение в ванте с учетом геометрической нелинейности определяется из уравнения состояния, которое в принятых обозначениях имеет вид

$$T_{jk}^3 + T_{jk}^2 \left(\frac{x_k \sin\varphi_j + y_k \cos\varphi_j}{L_j} \cos\alpha_j - \delta_j \right) EF_j = A_{jk}, \quad (97)$$

где $\delta_j = \frac{1}{EF_j}\left(T_{0j} - \frac{A_j^*}{T_{0j}}\right)$ — относительное удлинение j-ой ванты при монтажном натяжении T_{0j}; $A_j^* = \frac{g_j^2 L_j^2}{24} EF_j \cos^2\alpha_j$ и $A_{jk} = \frac{g_{jk} L_j}{24} EF_j$ — параметры нагрузки; x_k и y_k — горизонтальные смещения узлов в направлении осей x и y.

В уравнении (97) пренебрегаем влиянием на натяжение в ванте перемещений узла в плоскости, перпендикулярной хорде ванты. Горизонтальные проекции на оси x и y реакций k-го яруса вант:

$$\left.\begin{aligned} P_{yk}(x_k, y_k) &= \sum_{j=1}^{n} T_{jk} \cos\alpha_j \cos\varphi_j; \\ P_{xk}(x_k, y_k) &= \sum_{j=1}^{n} T_{jk} \cos\alpha_j \sin\varphi_j. \end{aligned}\right\} \quad (98)$$

Кроме того, эти реакции дадут приращение нормальной силы, действующей в $k-1$ пролете ствола

$$\Delta N_{k-1} = \sum_{j=1}^{n} T_{jk} \sin\alpha_j. \quad (99)$$

Обозначим реакции в наложенных связях k-го узла от статической составляющей ветровой нагрузки, действующей на ствол и ванты в направлениях x и y, через R_{jk}, M_{jk} и R_{xk} соответственно, тогда система уравнений равновесия узлов мачты в матричной форме под действием статической составляющей ветровой нагрузки будет иметь вид

$$\left\{\begin{aligned} & A_1^{(x,y)}(0)\vec{\gamma}_y + A_2^{(x,y)}(0)\vec{y} = \vec{M}; \\ & A_1^{(x,y)}(0)\vec{\gamma}_x + A_2^{(x,y)}(0)\vec{x} = 0; \\ & A_3^{(x,y)}(0)\vec{\gamma}_y + A_4^{(x,y)}(0)\vec{y} - \vec{P}_y(x, y) = \vec{R}_y; \\ & A_3^{(x,y)}(0)\vec{\gamma}_x + A_4^{(x,y)}(0)\vec{x} - \vec{P_x}(x, y) = \vec{R}_x, \end{aligned}\right. \quad (100)$$

где $\vec{y}$, $\vec{x}$, $\vec{\gamma}_y$, $\vec{\gamma}_x$ — p-мерные векторы обобщенных перемещений узлов; $\vec{P}_y(x, y)$, $\vec{P}_x(x, y)$ — р-мерные векторы с компонентами (98); $\vec{M}_y$, $\vec{R}_y$, $\vec{R}_x$ — p-мерные векторы реакций в наложенных связях от статической составляющей ветровой нагрузки; $A_1^{(x,y)}(0)$, $A_2^{(x,y)}(0)$, $A_3^{(x,y)}(0)$, $A_4^{(x,y)}(0)$ — элементы матрицы реакции ствола в основной системе, вычисленные в соответствии с табл. 20 данного приложения при значениях $\omega=0$ и $N_k=N_k^{\text{соб.вес}}+\Delta N_k$, причем значение ΔN_k вычисляется по формуле (99) от натяжений в вантах, вызванных смещениями x_k, y_k k-го узла.

Совокупность уравнений (100) представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений относительно обобщенных перемещений узлов мачты.

Динамический расчет мачты. В качестве расчетной модели, отражающей с достаточной для практики точностью напряженно деформированное состояние мачты при действии турбулентного ветра, может быть принята пространственная система, образованная стволом мачты и присоединенными к нему гибкими нитями, моделирующими ванты.

При исследовании колебаний такой системы можно не учитывать силы инерции в направлении хорд вант и считать, что кроме нитей в узлах присоединены упругоподатливые опоры, моделирующие деформации вант в продольном вдоль хорд направлении. Можно считать также, что деформации элементов мачт происходят в плоскости, образованной направлением ветра и осью элемента.

В качестве нагрузки на систему принимаются пульсационная составляющая давления ветра, рассматриваемая как пространственно-временной стационарный гауссовый случайный процесс. Учитывается пространственная корреляция продольной компоненты скорости ветра.

Вынужденные колебания мачты на вантах как нелинейной пространственной системы рассмотрены в работе [13].

Перемещения и усилия в элементах мачты представляются в виде конечных отрезков рядов по некоторой системе координатных функций, что позволяет свести задачу к системе связанных уравнений со случайными функциями в правой части. Затем методом статистической линеаризации из этих уравнений получаются средние квадраты перемещений и усилий в стволе и вантах.

При практической реализации алгоритма расчета мачт по указанной расчетной схеме возникает ряд трудностей, связанных с рациональным выбором координатных функций и решением вопросов, относящихся к учету пространственной корреляции пульсации скорости ветра.

Исследование этих вопросов удобнее производить на более простых моделях мачт, получающихся из рассматриваемой расчетной модели, если пренебречь теми или иными факторами. Так, пренебрегая геометрической нелинейностью вант, мы получим линейную пространственную систему, в которой гибкие нити заменены струнами, а упругоподатливые опоры, моделирующие деформации вант в продольном направлении, становятся линейными. Эту линейную пространственную модель будем называть моделью А.

Уравнения движения модели А могут быть записаны следующим образом:

а) для ствола как стержня, сжатого осевыми статическими силами,

$$m_k \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \psi_c \frac{\partial y}{\partial t} + EJ_k \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} - N_k \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \Phi(z, t); \qquad (101)$$

$$k = 1, 2, \ldots, r; \quad h_{k-1} \leqslant z \leqslant h_k,$$

где $\Phi(z, t)$ — пространственно-временной нормальный случайный процесс, стационарный по времени, описывающий пульсацию давления ветра на ствол;

б) для ванты-струны

$$\mu_{jk} \frac{\partial^2 w_{jk}}{\partial t^2} + \psi_в \frac{\partial w_{jk}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left[T_{0jk}(x) \frac{\partial w_{jk}}{\partial x'}\right] = \Phi_{jk}(x, t), \qquad (102)$$

$$k = 1, 2, \ldots, p; \quad j = 1, 2, \ldots, n;$$

где $\Phi_{jk}(x', t)$ — пространственно-временной случайный процесс, описывающий пульсацию давления ветра на ванту; ψ_c и $\psi_в$ — коэффициенты, характеризующие диссипацию энергии колебаний в стволе и ванте мачты.

Усилия в стволе определяются по формулам:

изгибающий момент $M(z, t) = -EJ_k \dfrac{\partial^2 y(z, t)}{\partial z^2}$;

поперечная сила $Q(z, t) = -EJ_k \dfrac{\partial^3 y(z, t)}{\partial z^3} + N_k y'(z, t)$.

Пульсационная составляющая натяжения в ванте

$$T_{jk}(t) = \frac{EF_{jk}}{L_{jk}} u_{jk}(t), \qquad (103)$$

где EF — жесткость ванты на растяжение; L — длина ванты; $u(t)$ — продольное смещение подвижного конца ванты.

К уравнениям (101) и (102) необходимо добавить граничные условия, выражающие собой отсутствие усилий на верхнем свободном конце ствола, отсутствие моментов в опоре ствола (в случае его шарнирного опирания) и отсутствие перемещений в опорах ствола и вант

$$y(0, t) = w_{jk}(0, t) = 0; \quad M(h_s, t) = Q(h_s, t) = 0; \qquad (104)$$

$$M(0, t) = 0.$$

Кроме того, в каждом узле должны выполняться геометрические и силовые условия совместности перемещений отдельных элементов мачты.

К геометрическим относятся условия непрерывности линии прогибов и функции углов поворота ствола, а также условия равенства горизонтальных перемещений ствола и горизонтальных проекций продольных и поперечных смещений вант в каждом узле

$$y(h_k - 0, t) = y(h_k + 0, t); \quad y'(h_k - 0, t) = y'(h_k + 0, t); \qquad (105)$$

$$w_{jk}(L, t) = y(h_k, t) \sin\theta_{jk}; \quad u_{jk}(L, t) = y(h_k, t) \cos\theta_{jk},$$

а к силовым — условия равновесия моментов и сил, приложенных к узлу:

$$M(h_k+0,t)-M(h_k-0,t)=0; \qquad (106)$$
$$Q(h_k+0,t)-Q(h_k-0,t)-R_k(t)=0.$$

Угол θ_{jk} связан с углами α_{jk} и φ_{jk} соотношением $\cos\theta_{jk}=\cos\alpha_{jk}\cos\varphi_{jk}$.

Реакция k-го яруса вант $R_k(t)$ на горизонтальное перемещение k-го узла имеет вид

$$R_k(t)=\sum_{j=1}^{n}\left[\sin\theta_{jk}\,T_{0jk}(L)\,w'_{jk}(L,t)-T_{jk}(t)\cos\theta_{jk}\right]. \qquad (107)$$

Совокупность уравнений (101) и (102) и условий (105) и (106) описывает вынужденные колебания мачты при действии ветра.

Если в модели А пренебречь силами инерции не только вдоль хорд, но и в перпендикулярном к хордам направлении, то вместо вант к стволу мачты окажутся присоединенными линейные упругоподатливые опоры, моделирующие упругие свойства вант. В этом случае первое слагаемое в выражении (107) обращается в нуль. Эту модель (стержень на упругоподатливых опорах) будем в дальнейшем называть моделью Б.

Представим перемещения k-го яруса ствола и его j-ой ванты в виде рядов по собственным формам

$$y_k(z,t)=\sum_{i=1}^{s}\alpha_{ki}(z)\,p_i(t);\quad w_{ij}(x',t)=\sum_{i=1}^{s}\beta_{jik}(x')\,p_i(t), \qquad (108)$$

где $\alpha_{ki}(z)$ и $\beta_{jki}(x')$ — соответственно собственные формы колебаний ствола и ванты; $p_i(t)$ обобщенные координаты системы.

Из формул (102) и (104) видно, что собственные частоты и формы колебаний мачты зависят от величины натяжения T_{0jk} в вантах, поэтому динамическому расчету мачты должен предшествовать статический расчет, из которого определяется натяжение в вантах в положении статического равновесия, соответствующего расчетному значению статической составляющей ветровой нагрузки.

Средние квадраты перемещений k-го пролета ствола и j-ой ванты k-го яруса определяются по формулам:

$$\sigma_y^2(z)=\sum_{i=1}^{s}\sum_{l=1}^{s}\alpha_{yi}(z)\,\alpha_{yl}(z)\,\overline{p_i(t)\,p_l(t)}; \qquad (109)$$

$$\sigma_w^2(x')=\sum_{i=1}^{s}\sum_{l=1}^{s}\beta_{ijk}(x')\,\beta_{ljk}(x')\,\overline{p_i(t)\,p_l(t)}.$$

Для того чтобы получить средние квадраты изгибающих моментов и поперечных сил в стволе, следует в выражении (109) для $\sigma_y^2(z)$ заменить собственные формы ствола соответствующими коэффициентами распределения изгибающих моментов и поперечных сил.

Средний квадрат натяжения на верхнем конце j-ой ванты k-го яруса

$$\sigma_T=\left(\frac{EF_{jk}\cos\theta_{jk}}{L_k}\right)^2\sum_{i=1}^{s}\sum_{l=1}^{s}\alpha_{yi}(h_k)\,\alpha_{yl}(h_k)\,\overline{p_i(t)\,p_l(t)}. \qquad (110)$$

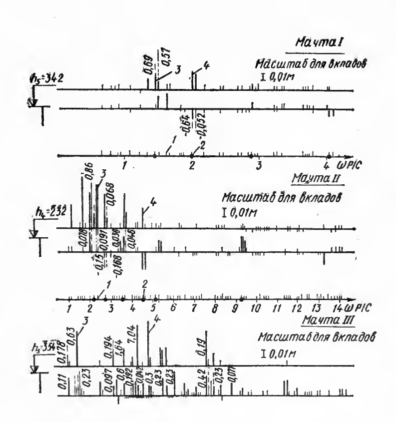
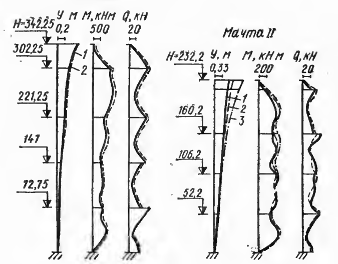


Рис. 12. Собственные частоты и вклады в стандарт перемещений верхнего узла по моделям А и Б

1 — собственные частоты модели А; *2* — собственные частоты модели Б; *3* — вклад по модели А; *4* — вклад по модели Б

Выражение для ковариации обобщенных координат приведено ниже.

По разработанной программе были вычислены по формулам (109) перемещения и усилия в стволе для трех типов мачт: I — четырехъярусной мачты с консолью высотой 342 м со стволом трубчатого сечения, представляющей собой опору для передающей телевизионной антенны; II — четырехъярусной мачты с консолью высотой 232 м с решетчатым стволом, служащей опорой для радиоантенны; III — пятиярусной мачты высотой 363,7 м с решетчатым стволом. Отличительной особенностью последней мачты является то, что кроме нижних четырех ярусов, состоящих каждый из трех вант, она имеет пятый ярус из двенадцати вант. Этот ярус помимо обычного конструктивного назначения выполняет роль радиоантенн.





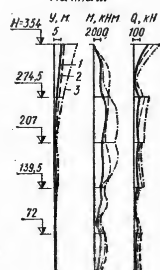


Рис. 13. Эпюры стандартов перемещений, моментов и поперечных сил

1 — модель А; 2 — модель Б; 3 — модель В с сосредоточенными массами в узлах

Расчет этих мачт производился в предположении, что пульсация давления ветра полностью коррелирована по пространству. В качестве расчетной схемы рассматривались модели А, В и модель Б с сосредоточенными в узлах массами, равными по величине полусумме масс вант соответствующего яруса.

На рис. 12, 13 для каждой из указанных мачт приведены: эпюры стандартов перемещений, моментов и поперечных сил в стволе, возникающих при вынужденных колебаниях моделей А, Б и модели Б с сосредоточенными в узлах массами; спектры собственных частот моделей А и Б; вклады в стандрат перемещений верхнего узла, соответствующие каждой собственной форме моделей А и Б (на верхнем по отношению к каждому узлу графике) и соответствующие взаимным корреляциям между i-ой собственной формой и собственными формами, номера которых меньше i (на нижнем по отношению к каждому узлу графике).

Полученные результаты показывают, что игнорирование масс вант при исследовании вынужденных колебаний мачты приводит к завышению получающихся в результате расчета величин перемещений и усилий в стволе. При этом наименьшая разница в результатах при расчете по моделям А и Б получается для мачты I с жестким стволом трубчатого сечения, масса которого намного превышает массу вант. Мачты II и III имеют относительно гибкий решетчатый ствол, масса которого значительно меньше отличается от массы вант, чем в мачте I. Для этих мачт разница в расчетных перемещениях и усилиях ствола значительно больше и достигает 60%.

Приближенный учет масс вант в модели Б путем введения сосредоточенных масс в узлах стержня на линейно-податливых опорах только ухудшает дело. В этом случае перемещения и усилия в стволе могут в несколько раз превышать те, которые получаются при использовании модели А.

По-видимому, в таких мачтах ванты являются не только промежуточными опорами для ствола, но и оказывают амортизирующее влияние на систему, причем эффект гашения колебаний возрастает с увеличением отношения масс вант и ствола и с уменьшением изгибной жесткости ствола.

Присоединение к стволу сосредоточенных масс в узлах просто уменьшает собственные частоты и тем самым увеличивает получающиеся стандарты перемещений и усилий в стволе.

Выводы, которые можно сделать на основе выполненных расчетов, сводятся к следующему:

1. Приближенный учет масс вант при использовании модели Б путем жесткого присоединения в узлах мачты сосредоточенных масс не отражает действительного влияния инерционных сил в вантах на колебание ствола.

2. Использование модели Б при рассмотрении вынужденных колебаний мачты по сравнению с моделью А идет в запас прочности.

По-видимому, областью применения модели Б являются мачты с весьма жестким и тяжелым стволом, размеры сечения которых назначаются главным образом не из прочностных, а из конструктивных и технологических соображений. Так, в мачте I ствол представляет собой трубу, размеры сечения и массы которой определяются главным образом необходимостью размещения в ней лифта и антенных фидеров.

Для таких мачт модель Б является наиболее приемлемой из всех линейных моделей, так как требует сравнительно небольшого объема вычислений и дает результаты, близкие к тем, которые получаются при использовании модели А.

3. При расчете мачт со сравнительно гибким и легким стволом или с большим числом вант в каком-либо ярусе по модели Б могут оказаться неучтенными значительные запасы прочности в конструкциях мачты.

Рис. 12 и 13 иллюстрируют ряд особенностей решения задачи А, присущих мачтам I, II, III:

1. Спектры собственных частот мачт отличаются большой густотой. Расположение их на частотной оси в порядке возрастания не отличается какой-либо закономерностью. Участки сгущения неупорядоченно сменяются более разреженными участками.

2. Вклады собственных форм в средние квадраты перемещений и особенно усилий в стволе для нескольких десятков первых собственных форм не уменьшаются монотонно с увеличением номера формы, как это имеет место, например, для консольного стержня, а колеблются по величине, причем вклад первой собственной формы оказывается меньше, чем вклад последующих.

3. При вычислении средних квадратов перемещений и усилий в стволе необходимо учитывать взаимные корреляции между обобщенными координатами, так как почти для всех форм, начиная со второй, вклад взаимных корреляций рассматриваемой формы с формами более низких номеров больше, чем вклад этой собственной формы.

4. Ряды, определяющие средние квадраты перемещений и усилий в стволе, сходятся очень медленно. Необходимо учитывать несколько десятков собственных форм при определении перемещений и соответственно еще больше — при определении усилий в стволе.

Из сказанного следует, что собственные формы модели А не могут быть использованы в качестве координатных функций при рассмотрении нелинейной пространственной системы, так как из-за плохой сходимости соответствующих рядов требования, предъявляемые алгоритмом расчета к вычислительным средствам, превышают возможности современных ЭВМ. Поэтому при рассмотрении этой модели [13] в качестве координатных функций в методе Бубнова-Галеркина использованы собственные формы некоторой основной системы смешанного метода. Основная система образуется из рассматриваемой таким образом, чтобы ствол и ванты оказались изолированными друг от друга, а спектр собственных частот каждого изолированного элемента основной системы — достаточно разреженным. Такой прием позволяет улучшить сходимость рядов, определяющих перемещения и усилия в стволе и вантах, и делает разработанный алгоритм расчета нелинейной и линейной пространственной системы пригодным для реализации на ЭВМ.

Рассмотрим теперь, что дает в применении к моделям А и Б учет пространственной корреляции пульсации скорости ветра.

Обобщенные силы мачты можно записать в виде

$$Q_i(t) = \sum_{k=1}^{r} \int_{h_{k-1}}^{h_k} q'(z, t)\, \alpha_{ik}(z)\, dz + \sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \int_{0}^{L_k} q'(x' \sin \alpha_k, t)\, \beta_{jki}(x')\, dx'. \qquad (111)$$

Интенсивность пульсации давления ветра на k-ый ярус ствола

$$q_k'(z, t) = \frac{2q_0}{v_0} B_k(z)\, v'(z, t), \quad \text{где } B_k(z) = c_{xk}\, d_k \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha_t}, \quad (112)$$

где q_0, v_0 — соответственно нормативные скоростной напор и скорость ветра на уровне 10 м; $v'(z, t)$ — пульсация продольной компоненты скорости на уровне z; α_t — показатель степени в законе, характеризующем изменение нормативной скорости ветра по высоте сооружения; c_{xk} — коэффициент лобового сопротивления k-го пролета ствола; d_k — характерный размер его поперечного сечения.

Интенсивность пульсации давления ветра на ванту

$$q_{jk}'(x' \sin\alpha_k, t) = 2\frac{q_0}{v_0} c_{jk}(x', \theta)\, v'(x' \sin\alpha_k, t), \quad (113)$$

$$\text{где } c_{jk}(x', \theta) = \left(\frac{x' \sin\alpha_k}{10}\right)^{\alpha_t} c_{xjk} \sin^2\theta_{jk}\, d_{jk},$$

c_{xjk} — коэффициент лобового сопротивления для вертикальной ванты; d_{jk} — ее диаметр.

Подставляя выражения (112) и (113) в (111), получим

$$Q_i(t) = \sum_{k=1}^{r} \int_{h_{k-1}}^{h_k} B_k(z)\, \alpha_{ik}(z)\, v_k'(z, t)\, dz +$$

$$+ \sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \int_0^{L_k} C_{jk}(x')\, \beta_{ik}(x')\, v'(x' \sin\alpha_k, t)\, dx'.$$

Взаимная спектральная плотность обобщенных сил $Q_i(t)$ и $Q_l(t)$

$$S_{Q_iQ_l}(\varepsilon) = 4\left(q_0 \gamma_т\right)^2 S_{v'}^{н}(\varepsilon)\, J_1(\chi, \varepsilon), \quad (114)$$

$$\text{где } J_1(\chi, \varepsilon) = \sum_{k=1}^{r} \sum_{k'=1}^{r} \int_{h_{k-1}}^{h_k} \int_{h_{k'-1}}^{h_{k'}} B_k(z_1)\, B_{k'}(z_2)\, \alpha_{ik}(z_1)\, \alpha_{lk'}(z_2) \times$$

$$\times R(\chi, \varepsilon)\, dz_1\, dz_2 + \sum_{k=1}^{r} \sum_{k'=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \int_{h_{k-1}}^{h_k} B_k(z_1) \times$$

$$\times \Bigg[\alpha_{ik}(z_1)\, a_{lk'} \int_0^{L_{k'}} C_{jk'}(x')\, \beta_{ljk'}(x')\, dx' +$$

$$+ \alpha_{lk}(z_1)\, a_{k'i} \int_0^{L_{k'}} C_{jk'}(x')\, \beta_{ljk'}(x')\, dx' \Bigg] R(\chi, \varepsilon)\, dz_1 +$$

$$+ \sum_{k=1}^{m} \sum_{k'=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \sum_{j'=1}^{n} a_{k'l}\, a_{k'l} \int_0^{L_k} \int_0^{L_{k'}} C_{jk}(x_1')\, C_{j'k'}(x_2')\, \beta_{ijk}(x_1') \times$$

$$\times \beta_{lj'k'}(x_2')\, R(\chi, \varepsilon)\, dx_1'\, dx_2', \quad (115)$$

$R(\chi, \varepsilon) = \exp\left(-\frac{\varkappa}{\varepsilon}\right)$ — коэффициент взаимной корреляции пульсации скорости для гармоник с частотой n (рис. 14);

$$\chi = \frac{1}{150}\left[\left|z_1 \sin\alpha_1 - z_2 \sin\alpha_2\right| + \left|\left(L_2 - x_2'\right)\cos\alpha_2\cos\varphi_2 - \right.\right.$$

$$\left.\left. -\left(L_1 - x_1'\right)\cos\alpha_1\cos\varphi_1\right|\right] + \frac{1}{60}\left|\left(L_2 - x_2'\right)\cos\alpha_2\sin\varphi_2 - \right.$$

$$\left. - \left(L_1 - x_1'\right)\cos\alpha_1\sin\varphi_1\right|. \qquad (116)$$

Если z_1 или z_2 означают координаты точки ствола, то α_1 и α_2 принимаются равными $\pi/2$;

$$a_{k'l} = \begin{cases} \frac{1}{2}\,\alpha_{lk'}(h_{k'}) & \text{для модели Б} \\ 1 & \text{» » А} \end{cases}$$

Для модели Б принимается $\beta_{ljk}\left(x_1'\right) = 1$.

Ковариация обобщенных координат

$$\overline{p_l(t)\,p_l(t)} = \frac{8\,(q_0\gamma_{\text{т}})^2}{3M_i\,M_l\,\omega_i^2\,\omega_l^2}\,\nu_{il}, \qquad (117)$$

где ν_{il} и $J_1(\varepsilon)$ определяются по формулам (34) и (115).

Для расчетных динамических перемещений и нормативных усилий в стволе и вантах может быть написано следующее выражение:

$$y_{\text{р}}(z) = \alpha_{\text{с}}\,\sigma_y(z) = 0,8165 m_0 q_0 D_{yll}(z), \qquad (118)$$

$$\text{где } D_{yll}(z) = \left(\sum_{i=1}^{s}\sum_{l=1}^{s}\frac{\alpha_{yl}(z)\,\alpha_{yl}(z)\,\nu_{il}}{M_l\,M_l\,\omega_i^2\,\omega_l^2}\right)^{1/2}.$$

Здесь q_0 и m_0 — соответственно нормативный скоростной напор и коэффициент пульсации на уровне 10 м.

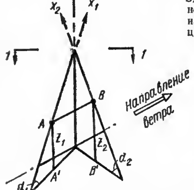


Рис. 14. Геометрическая схема мачты с вантами для определения параметра χ

Нормативные значения изгибающих моментов и поперечных сил получаются из выражения (118) путем замены $D_{yil}(z)$ на $D_{Mil}(z)$ и $D_{Qil}(z)$

$$T_{pjk}(h_k) = 0{,}8165 m_0 q_0 \frac{EF_{jk}\cos\theta_{jk}}{L_k} D_{yil}(z). \qquad (119)$$

Чтобы получить $D_{Mil}(z)$ и $D_{Qil}(z)$, следует в выражении для $D_{yil}(z)$ заменить $\alpha_{yi}(z)$ и $\alpha_{yl}(z)$ на $\alpha_{Mi}(z)$, $\alpha_{Ml}(z)$ и на $\alpha_{Qi}(z)$ и $\alpha_{Ql}(z)$.

Для определения динамической составляющей ветровой нагрузки (инерционной силы) $q_{ин}(z, t)$ представим упругую силу на единицу высоты k-го яруса ствола мачты в таком виде

$$S_{упр}(z, t) = EJ_k \frac{\partial^4 y(z, t)}{\partial z^4} = EJ_k \sum_{i=1}^{s} \frac{d^4 \alpha_{ik}(z)}{dz^4} p_i(t) =$$

$$= \mu_k \sum_{i=1}^{s} \omega_i^2 \alpha_i(z) p_i(t) = \mu_k \sum_{i=1}^{s} \omega_i^2 y_i(z, t) = q_{ин}(z, t). \qquad (120)$$

Средний квадрат инерционной силы

$$\overline{q_{ин}^2(z, t)} = \mu_k^2 \sum_{i=1}^{s} \sum_{l=1}^{s} \omega_i^2 \omega_l^2 \alpha_i(z) \alpha_l(z) \overline{p_i(t) p_l(t)}.$$

Нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки

$$q_{ин,н} = 0{,}8165 m_0 q_0 \mu_k E_{il}, \qquad (121)$$

где

$$E_{il} = \left(\sum_{i=1}^{s} \sum_{l=1}^{s} \frac{\alpha_i(z) \alpha_l(z) v_{il}}{M_i M_l} \right)^{1/2}.$$

Выражение для взаимной спектральной плотности пульсации давления ветра показывает, что тройной интеграл в формуле для ковариации обобщенных координат (34) можно определить только численным путем. Однако попытка повторного применения квадратурных формул при вычислении выражения (34) приводит к чрезмерно большому числу вычислений, практически не выполнимых даже с помощью ЭВМ. Объясняется это тем, что в процессе тройного интегрирования приходится многократно вычислять несобственный интеграл

$$I(\chi) = \int_0^\infty \frac{\varepsilon^{11/3}\left[\varepsilon^4 - \left(\varepsilon_i^2 + \varepsilon_l^2 - \gamma^2 \varepsilon_i \varepsilon_l\right)\varepsilon^2 + \right.}{(1+\varepsilon^2)^{4/3}\left[\varepsilon^4 - 2\left(1 - \frac{\gamma^2}{2}\right)\varepsilon_i^2 \varepsilon^2 + \varepsilon_i^4\right] \times} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\left. + \varepsilon_i^2 \varepsilon_l^2\right] R(\chi, \varepsilon) d\varepsilon}{\times \left[\varepsilon^4 - 2\left(1 - \frac{\gamma^2}{2}\right)\varepsilon_l^2 \varepsilon^2 + \varepsilon_l^4\right]}. \qquad (122)$$

В разработанной программе для ЭВМ 220, осуществляющей вычисление ковариаций обобщенных координат для модели Б, мачта разбивается на конечное число участков, длина каждого из которых выбирается настолько малой, чтобы можно было пренебречь пространственной корреляцией пульсации скоростного напора в различных точках одного участка и считать, что приложенные на нем силы полностью коррелированы между собой. В этом случае формула (33) принимает вид

$$\overline{p_i(t)\, p_l(t)} = \sum_{k=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \Psi_{ik}\, \Psi_{lj}\, I(\chi_{kj}), \tag{123}$$

где N — число участков.

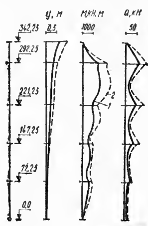
$$\Psi_{ik} = \begin{cases} \int\limits_{a_k}^{b_k} \alpha_{im}(z)\, B_m(z)\, dz & \text{— для } k\text{-го участка ствола, лежащего в } m\text{-ом пролете} \\ \alpha_{im}(h_m) \int\limits_{a_k}^{b_k} C_{mt}(x')\, dx' & \text{— для } k\text{-го участка } t\text{-ой ванты } m\text{-го яруса} \end{cases}$$

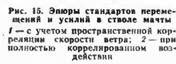
a_k и b_k — координаты начала и конца k-го участка; χ_{kj} — вычисляется по формуле (116) причем в качестве z и x' принимаются координаты каких-либо точек (например, середин) k-го и j-го участков.

Поскольку функция $I(\chi)$ экспоненциально убывает с ростом χ, то при заданном k суммирование во второй сумме выражения (123) производится только для участков, близко расположенных к k-ому. При этом считается, что сила, приложенная к участкам, далеко лежащим друг от друга, статистически независимы.

Для того чтобы избежать многократного вычисления интеграла (122), разработана процедура, которая по заданным значениям ε_i и ε_l на заданном интервале $[0,\ \chi_{\max}]$ вычисляет таблицу значений $I(\chi)$. При этом точки χ_i, в которых вычисляются значения $I(\chi_i)$, располагаются на интервале $[0,\ \chi_{\max}]$ таким образом, чтобы минимизировать приращения второй производной подынтегральной функции в (122).

Значения $I(\chi_{kj})$ в (123) вычисляются по таблице путем квадратичного интерполирования, что дает примерно такую же погрешность, как повторное применение формулы Симпсона с числом разбиений интервала интегрирования, равным размерности таблицы. По составленной программе была рассчитана мачта I.




Рис. 15. Эпюры стандартов перемещений и усилий в стволе мачты

1 — с учетом пространственной корреляции скорости ветра; *2* — при полностью коррелированном воздействии

На рис. 15 изображены эпюры стандартов перемещений и усилий в стволе, полученные в результате расчета. На этом же рисунке показаны результаты расчета в случае, если функция $I(\chi) = I(\theta)$ от χ не зависит.

Этот случай соответствует предположению о том, что пульсации давления ветра полностью коррелированы по пространству. Сравнение результатов расчета показывает, что учет пространственной корреляции может снизить получаемые перемещения и усилия в стволе на 50—60%.

Динамический расчет цепочки мачт. Собственные частоты и формы колебаний такой системы определяются известными методами динамики сооружений.

Перемещения m-го яруса ствола можно представить в виде ряда по собственным формам $\alpha_{jm}(z)$.

Обобщенную силу системы, соответствующую j-ой собственной форме, запишем в таком виде:

$$Q_j(t) = \frac{2q_0}{v_0} \sum_{i=1}^{k} \sum_{m=1}^{r} \int_{h_{m-1}}^{h_m} B_m(z)\, v'_{im}\left(z,\ x_i,\ t\right) \alpha_{ijm}(z)\, dz. \quad (124)$$

Здесь q_0, v_0 — соответственно нормативные скоростной напор и скорость ветра на уровне 10 м; $v'(z, t)$ — пульсация продольной компоненты скорости на уровне z; c_{xm} — коэффициент лобового сопротивления m — яруса ствола; d_m — характеристический размер его поперечного сечения; i, m, j — соответственно номера мачты, яруса и собственной формы колебаний; k, r, s — соответственно число мачт, ярусов и учитываемых собственных форм

$$B_m(z) = c_{xm}\, d_m \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha_t}.$$

Взаимная спектральная плотность обобщенных сил $Q_j(t)$ и $Q_l(t)$

$$S_{Q_jQ_l}(\varepsilon) = 4\left(q_0 \gamma_т\right)^2 S^{н}_{v'}(\varepsilon)\, J(\varepsilon), \quad (125)$$

где $\gamma_т$ определяется по формуле (2); $S^{н}_{v'}$ — нормированный спектр, принимаемый по формуле (4);

$$J(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{k} \sum_{i'=1}^{k} \sum_{m=1}^{r} \sum_{m'=1}^{r} \int_{h_{m-1}}^{h_m} \int_{h_{m'-1}}^{h_{m'}} B_m(z)\, B_{m'}(z')\, \alpha_{iml}(z) \times$$

$$\times\, \alpha_{i'm'l'}(z') \exp\left(\frac{-\left| z_m - z'_{m'}\right| - \left|x_i - x_{i'}\right|}{150\varepsilon}\right) dz dz'. \quad (126)$$

Выражения для средних квадратов перемещений m-го яруса ствола и для ковариации обобщенных координат имеют вид (109) и (117), где ν_{jl} и $J(\varepsilon)$ определяются по формулам (34) и (126).

Расчетные динамические перемещения и нормативные усилия в стволе определяются по формуле (118).

Градирни. Башня градирни представляет собой тонкую железобетонную оболочку, имеющую форму гиперболоида вращения. Ме-

ридианы и параллели поверхности вращения являются ее линиями главной кривизны.

Главные радиусы кривизны поверхности оболочки

$$R_1 = -\frac{a \sin^2 \alpha \cos \alpha}{(\cos^2\alpha - \cos^2 \theta)^{3/2}}, \quad R_2 = \frac{R}{\sin \theta}. \qquad (127)$$

Здесь R_1 — радиус кривизны поверхности в направлении меридиана; R_2 — радиус кривизны поверхности в направлении параллели; R — радиус окружности параллели; θ — угол, образованный нормалью к поверхности и осью вращения; $\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{a}$; b и a — полуоси гиперболы (рис. 16).

Поверхность оболочки ограничена плоскостями, перпендикулярными оси ее вращения (оси z); верхняя граница ограничена плоскостью $z = z_t$; нижняя — плоскостью $z = |z_b|$.

Градирня как оболочка полностью определяется тремя отношениями a/b, a/R_t, a/R_b, где R_t и R_b — соответственно радиусы верхней и нижней параллелей.

Уравнение рассматриваемой поверхности имеет вид

$$x = R \cos \varphi; \quad y = R \sin \varphi; \quad z = \pm \frac{b}{a} \sqrt{R^2 - a^2}.$$

Учет статической составляющей ветровой нагрузки. Напряженно деформированное состояние оболочки может быть определено известными методами теории тонких оболочек [34], если задано распределение давления ветра по ее поверхности.

Как известно, это распределение зависит от числа Рейнольдса и коэффициента неровности поверхности δ/d, где δ — величина неровности, d — средний диаметр оболочки. Для построения кривой распределения давления ветра как функции угла φ необходимо знать следующие ее параметры: максимальное давление $\max c(\varphi)_{\varphi=0}$, угол φ_0, при котором локальное давление равно статическому давлению невозмущенного потока $c(\varphi_0) = 0$, максимальный отсос $\min c(\varphi) = M$ и соответствующий ему угол φ_1, угол φ_2, при котором давление становится постоянным и его величина $c(\varphi_2) = r$.

Поскольку $\max c(\varphi_1) = 1$, то число параметров, определяющих кривую распределения давления, равно 5.

Экспериментально установлено [68], что параметры φ_0, φ_1 и φ_2

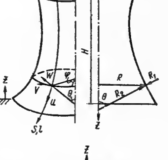


Рис. 16. Геометрическая схема оболочки градирни

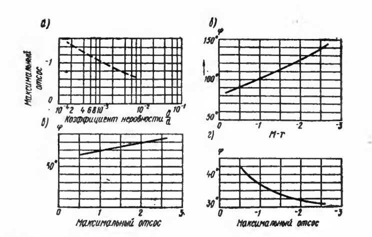


Рис. 17. Графики для определения параметров кривой распределения давления

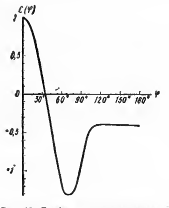


Рис. 18. График распределения давления по поверхности градирни

являются функциями *M* и *r*. Параметр *r* для любого коэффициента неровности поверхности и чисел Рейнольдса, больших критического, остается постоянным и равным 0,4. Отсюда следует, что распределение давления определяется единственным параметром — максимальным отсосом *M*.

Градирни имеют числа Рейнольдса, соответствующие транскритическим. Установлено, что для транскритического состояния потока значение максимального отсоса при изменении числа Рейнольдса практически не меняется и максимальный отсос определяется коэффициентом неровности поверхности. Этот коэффициент и определяет кривую распределения давления.

Учитывая сказанное, можно кривую распределения давления построить по графикам, приведенным на рис. 17, *в* следующей последовательности: по заданному коэффициенту неровности δ/d определяют максимальный отсос из графика «а», принимая $r=0{,}4$, определяют φ_0 из графика «г», φ_1 из графика «в» и φ_2 из графика «б».

По полученным параметрам строится гладкая кривая распределения давления, показанная на рис. 18.

Распределение давления ветра по поверхности градирни можно получить на основании данных испытаний градирен в натурных условиях или моделей в аэродинамической трубе. Однако, как пока-

зывают эксперименты, в натурных условиях получаются меньшие максимальные отсосы, чем на моделях градирен, что объясняется, по-видимому, значительной разницей в числах Рейнольдса.

Указания по определению коэффициентов распределения давления ветра для градирен с умеренно шероховатой и шероховатой наружной поверхностью даны в п. 5.1 и в работе [76].

Вынужденные колебания градирни при действии ветра. Собственные частоты и формы колебаний оболочек вращения исследованы в настоящее время достаточно подробно [17, 35, 45, 48, 51, 63].

При анализе вынужденных колебаний принимается, что указанные динамические характеристики градирни заданы.

Пусть $u(s, \varphi, t)$, $v(s, \varphi, t)$ и $w(s, \varphi, t)$ — соответственно меридиональные, вдоль параллели и нормальные перемещения точек срединной поверхности оболочки.

Представим эти перемещения в виде двойных рядов по собственным формам колебаний.

$$\left.\begin{aligned} u(s, \varphi, t) &= \sum_i \sum_j \left[p_{ij}(t) \cos j\varphi + p'_{ij}(t) \sin j\varphi\right] \alpha_{uij}(s); \\ v(s, \varphi, t) &= \sum_i \sum_j \left[p_{ij}(t) \sin j\varphi - p'_{ij}(t) \cos j\varphi\right] \alpha_{vij}(s); \\ w(s, \varphi, t) &= \sum_i \sum_j \left[p_{ij}(t) \cos j\varphi + p'_{ij}(t) \sin j\varphi\right] \alpha_{wij}(s). \end{aligned}\right\} \qquad (128)$$

Здесь $\alpha_{uij}(s)$, $\alpha_{vij}(s)$ и $\alpha_{wij}(s)$ — формы собственных колебаний вдоль меридиана, параллели и по направлению нормали к срединной поверхности; i — номер формы по вертикали; j — номер гармоники в окружном направлении; $p_{ij}(t)$ и $p'_{ij}(t)$ — симметричные и кососимметричные обобщенные координаты.

Задача о вынужденных колебаниях в турбулентном потоке ветра оболочки градирни, представляющей собой континуальную упругую систему, подстановкой перемещений в виде рядов (128) в соответствующие уравнения колебаний тонкой оболочки сводится к решению для каждой формы собственных колебаний, определяемой парой индексов (i, j), следующей пары уравнений относительно обобщенных координат $p_{ij}(t)$ и $p'_{ij}(t)$:

$$\left.\begin{aligned} \ddot{p}_{ij}(t) + \gamma\omega_{ij}\dot{p}_{ij}(t) + \omega_{ij}^2 p_{ij}(t) &= \frac{Q_{ij}(t)}{M_{ij}}, \\ \ddot{p}'_{ij}(t) + \gamma\omega_{ij}\dot{p}'_{ij}(t) + \omega_{ij}^2 p'_{ij}(t) &= \frac{Q'_{ij}(t)}{M_{ij}}. \end{aligned}\right\} \qquad (129)$$

Здесь ω_{ij} — круговая частота собственных колебаний; $Q_{ij}(t)$, $Q'_{ij}(t)$ — обобщенные силы; M_{ij} — обобщенная масса.

Обобщенные силы $Q_{ij}(t)$ и $Q'_{ij}(t)$, соответствующие ij-ой форме собственных колебаний, можно записать в таком виде:

$$\left.\begin{aligned} Q_{ij}(t) &= \int_0^{2\pi}\int_0^{s_0} q'_0(s, \varphi, t)\, \alpha_{wij}(s) \cos i\varphi R(s)\, d\varphi ds; \\ Q'_{ij}(t) &= \int_0^{2\pi}\int_0^{s_0} q'_0(s, \varphi, t)\, \alpha_{wij}(s) \sin i\varphi R(s)\, d\varphi ds. \end{aligned}\right\} \qquad (130)$$

Здесь $q_0^{\bullet}(s, \varphi, t)$ — нормальная к поверхности оболочки пульсация давления ветра; $R(s)$ — радиус параллели. В выражениях для обобщенных сил учитываются только изгибные колебания, т. е. перемещения, нормальные к срединной поверхности оболочки. При определении обобщенной массы учитываются все составляющие вектора перемещений

$$M_{ij} = \int_0^{2\pi}\int_0^{s_0} \left(\alpha_{uij}^2 + \alpha_{vij}^2 + \alpha_{wij}^2\right) \rho h R(s)\, ds d\varphi, \qquad (131)$$

где ρ — плотность материала оболочки; h — ее толщина; s_0 — полная длина меридиана. Средний квадрат перемещений $w(s, \varphi, t)$ имеет вид

$$\sigma_w^2(s) = \sum_i \sum_{j} \sum_l \sum_m \left[\overline{p_{ij}(t)\, p_{lm}(t)} \cos j\varphi \cos m\varphi + \right.$$

$$+ \overline{p_{ij}^{\prime}(t)\, p_{lm}^{\prime}(t)} \sin j\varphi \sin m\varphi + \overline{p_{ij}(t)\, p_{lm}^{\prime}(t)} \cos j\varphi \sin m\varphi +$$

$$\left. + \overline{p_{ij}^{\prime}(t)\, p_{lm}(t)} \sin j\varphi \cos m\varphi \right] \alpha_{wij}(s)\, \alpha_{wlm}(s). \qquad (132)$$

При суммировании в выражении (132) обычно ограничиваются небольшим числом членов ряда. Минимальное число членов ряда, позволяющее получить надежную в практическом отношении оценку реакции, составляет $i=l=1$; $j=m$ от 4 до 6; $i=l=2$; $j=m$ от 1 до 3. Третьим и четвертым членами выражения (132) можно пренебречь.

Ковариация обобщенных координат имеет вид

$$\overline{p_{ij}(t)\, p_{lm}(t)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \Phi_{ij}(i\omega)\, \Phi_{lm}^{*}(i\omega)\, S_{Q_{ij}Q_{lm}}(\omega)\, d\omega. \qquad (133)$$

Ковариация $\overline{p_{ij}^{\prime}(t) p_{lm}(t)}$ получается из выражения (133) путем замены $S_{Q_{ij}Q_{lm}}(\omega)$ на $S_{Q_{ij}^{\prime}Q_{lm}^{\prime}}(\omega)$. Произведение передаточных функций системы $\Phi_{ij}(i\omega)\Phi_{lm}(i\omega)$ определяется по формуле (29).

Пусть известна взаимная спектральная плотность пульсации давления ветра $S_{q_0^{\prime}}(s, \varphi, s', \varphi', \varepsilon)$, тогда взаимные спектральные плотности симметричных и кососимметричных компонент обобщенных координат можно записать в таком виде:

$$\left.\begin{aligned} S_{Q_{ij}Q_{lm}}(\varepsilon) &= \int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{s_0}\int_0^{s_0} S_{q_0^{\prime}}(s, \varphi, s', \varphi', \varepsilon)\, \alpha_{wij}(s)\, \alpha_{wlm}(s) \times \\ &\times \cos j\varphi \cos m\varphi' R(s)\, R(s')\, d\varphi d\varphi' ds ds'; \\ S_{Q_{ij}^{\prime}Q_{lm}^{\prime}}(\varepsilon) &= \int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{s_0}\int_0^{s_0} S_{q_0^{\prime}}(s, \varphi, s', \varphi', \varepsilon)\, \alpha_{wij}(s)\, \alpha_{wlm}(s) \times \\ &\times \sin j\varphi \sin m\varphi' R(s)\, R(s')\, d\varphi d\varphi' ds ds'. \end{aligned}\right\} \qquad (134)$$

Здесь $\varepsilon = 1/u = v_0/1200n$; n — частота, Гц.

Анализ спектров и взаимных спектральных плотностей пульсации давления ветра, выполненный на основании модельных измерений в аэродинамической трубе, позволяет сделать следующие упрощающие предположения [64]:

1. Поверхность градирни можно разбить на две области, ограниченные меридианами, проходящие через точки отрыва вихрей. Каждая область характеризуется своим спектром.

2. Взаимные спектры в наветренной области зависят от расположения точек на параллели. Остальные взаимные спектры не зависят от расположения точек по горизонтали и вертикали.

3. Квадратурные спектры малы и ими можно пренебречь. Можно также пренебречь корреляцией между наветренной областью и зоной следа.

Выражения для спектров давления и функции когерентности приведены в работе [64].

Более грубую оценку для реакции градирни на действие пульсации давления можно получить, если использовать для этого сооружения решетчатую модель и подход, принятый выше при анализе протяженных в плане зданий.

Пульсационную составляющую давления ветра можно записать так:

$$q'(s, \varphi, t) \approx 2q^{c}(z, \varphi)\frac{v'(z, t)}{v(z)}, \qquad (135)$$

где $$q^{c}(z, \varphi) = q_{0}c(\varphi)\left(\frac{z}{10}\right)^{2\alpha_t}.$$

Взаимную спектральную плотность давления в точках z, φ и z', φ' можно записать в таком виде:

$$S_{q'}(z, \varphi, z', \varphi', u) = 4q^{c}(z, \varphi)\, q^{c}(z', \varphi')\gamma_{т}(z)\,\gamma_{т}(z')S^{н}_{v'}(z, z', u). \qquad (136)$$

Здесь взаимная спектральная плотность пульсации продольной компоненты скорости в двух произвольных точках может быть представлена в виде произведения спектральной плотности в точке (z_0, φ_0) на уровне 10 м на коэффициенты взаимной корреляции как по высоте, так и вдоль параллели оболочки

$$S^{н}_{v'}(z, z', \varphi, \varphi', u) = S^{н}_{v'}(z_0, \varphi_0, u)\, R_{v'}(z, z', u)\, R_{v'}(\varphi, \varphi', u). \qquad (137)$$

Коэффициент взаимной корреляции продольных пульсаций скорости по высоте между уровнями z и z'

$$R_{v'}(z, z', \varepsilon) = \exp\left[-\frac{|z - z'|}{150\varepsilon}\right], \qquad (138)$$

Коэффициент корреляции вдоль параллели оболочки градирни

$$R_{v'}(\varphi, \varphi', \varepsilon) = \exp\left[-\frac{r(z)\,|\varphi' - \varphi|}{60\varepsilon}\right], \qquad (139)$$

$\gamma_{т}(z)$ и $\gamma_{т}(z')$ — интенсивность турбулентности на уровнях z и z'.

Принимая во внимание, что для гиперболических градирен из-

менение среднего радиуса параллели в зависимости от высоты относительно невелико, примем в последнем выражении

$$r(z) = \frac{r(z_b) + r(0)}{2} = r_c,$$

где $r(0)$ — радиус параллели у горловины градирни ($z=0$); $r(z_b)$ — радиус параллели у основания.

В этом случае выражение (139) будет иметь вид

$$R_{v'}(\varphi', \varphi, \varepsilon) = \exp\left[-\frac{r_c |\varphi' - \varphi|}{60\varepsilon}\right]. \qquad (140)$$

Используя выражения (137), (138) и (140), можно нормированную спектральную плотность продольных пульсаций скорости записать в таком виде:

$$S^{н}_{v'}(z, z', \varphi, \varphi', \varepsilon) = \frac{1200\varepsilon^{5/3}}{3v_0(1+\varepsilon^2)^{4/3}} \times$$
$$\times \exp\left[-\frac{|z - z'|}{150\varepsilon}\right] \exp\left[-\frac{r_c |\varphi' - \varphi|}{60\varepsilon}\right]. \qquad (141)$$

Тогда для ковариации обобщенных координат получим выражение

$$\overline{p_{ij}(t)\, p_{lm}(t)} = \frac{8v^2_{ijlm}}{3M_{ij} M_{lm} \omega^2_{ij} \omega^2_{lm}}, \qquad (142)$$

где v^2_{ijlm} определяется по формуле (34)

$$J_{ijlm}(\varepsilon) = \int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{н}\int_0^{н} q^c(z_1, \varphi)\, q^c(z_1', \varphi')\, \gamma_т(z_1)\, \gamma_т(z_1')\, \alpha_{wij}(z_1) \times$$
$$\times \alpha_{wlm}(z_1') \cos j\varphi \cos m\varphi' R(z_1) R(z_1') \times$$
$$\times \exp\left[-\frac{|z_1 - z_1'|}{150\varepsilon}\right] \exp\left[-\frac{r_c |\varphi - \varphi'|}{60\varepsilon}\right] dz_1\, dz_1'\, d\varphi\, d\varphi',$$
$$z_1 = z + |z_b|, \qquad (143)$$

где координата z_1 отсчитывается от основания градирни, а координата z — от горловины башни

$$r(z_1) = \frac{a}{b}\sqrt{(z_1 - |z_b|)^2 + b^2}. \qquad (144)$$

Аналогичным образом вычисляется ковариация обобщенных координат

$$\overline{\dot{p}_{ij}(t)\, \dot{p}_{lm}(t)}.$$

Зная расчетные значения перемещений, по известным в теории оболочек [34] уравнениям, связывающим деформации с перемещениями и усилия с деформациями, определяются расчетные значения усилий.

6. АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВЫСОКИХ СООРУЖЕНИЙ И ГИБКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В практике эксплуатации высоких сооружений и гибких конструкций хорошо известны случаи, когда такие системы, достаточно надежные при действии на них установившихся ветровых нагрузок, обнаруживают в условиях естественного ветра склонность к раскачиванию, т. е. становятся аэродинамически неустойчивыми. Такого рода неустойчивость отражает взаимодействие между сооружением и потоком ветра.

Рассмотрим типичные для высоких сооружений два явления аэродинамической неустойчивости.

Первое — вихревое возбуждение наблюдается при колебаниях дымовых труб, радиомачт и тому подобных гибких сооружений цилиндрической формы и объясняется вихреобразованием в следе за сооружением при обтекании его потоком ветра.

Второе явление общепринято называть галопированием. Галопированию подвержены плохо обтекаемые гибкие конструкции с аэродинамически неустойчивыми поперечными сечениями (квадратным, прямоугольным и ромбовидным), покрытые льдом провода антенно-мачтовых систем и линий электропередачи, а также конструктивные элементы из уголков и швеллеров высоких опор ЛЭП. Колебания такого типа определяются формой и расположением тела относительно потока, его изгибной и крутильной жесткостями, и, наконец, величиной конструкционного демпфирования.

Вихревое возбуждение сооружений цилиндрической формы.

Характер колебаний цилиндра в потоке ветра. Рассмотрим характерные черты колебаний, возбуждаемых вихрями, на примере кругового цилиндра.

Главная трудность при исследовании этого явления состоит в том, что нестационарные аэродинамические силы, действующие как на неподвижный, так и на колеблющийся цилиндр, сильно зависят от чисел Рейнольдса Re и теоретически не могут быть определены.

Хорошо изучена картина обтекания неподвижного цилиндра потоком воздуха [33, 43, 52, 60]. При $Re<10$ ламинарный поток еще плотно прилегает к цилиндру; с увеличением числа Рейнольдса позади цилиндра образуются два стационарных вихря, которые растут и, наконец, отрываются от основного потока при $Re=40$. При $Re>50$ начинается попеременный отрыв вихрей и образуется вихревая дорожка. Область этого ламинарного отрыва распространяется до 150.

Область между $Re=150$ и $Re=300$ является переходной, поток в вихревой дорожке становится турбулентным, а отрыв вихрей нерегулярным. Начиная с $Re=300$ в отрыве вихрей наблюдается периодичность, причем на колебания потока с преобладающей частотой налагаются турбулентные флуктуации. Этот процесс остается неизменным до $Re=2\cdot10^5$. Выше этого значения Re пограничный слой на цилиндре становится турбулентным, отрыв вихрей происходит без преобладающей частоты, совершенно нерегулярно. Это состояние потока сохраняется до $Re=5\cdot10^6$. Измерения Чинкотта и других [52] в так называемой транскритической области чисел Рейнольдса $Re>5\cdot10^6$ показали, что в этом случае снова устанавливается периодический след с почти постоянным коэффи-

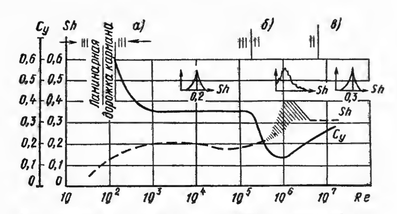


Рис. 19. Зависимость чисел Струхаля Sh и коэффициента поперечной силы c_y для кругового цилиндра от чисел Рейнольдса

а — ламинарный пограничный слой, докритическая область, турбулентная вихревая дорожка; *б* — турбулентный пограничный слой, закритическая область, процесс случайный; *в* — транскритическая область, процесс содержит периодическую составляющую

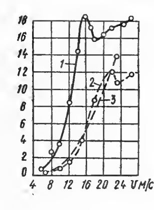


Рис. 20. Изменение амплитуд колебаний цилиндра $d=0{,}8$ и на упругих опорах в зависимости от скоростей потока. Собственная частота колебаний опор

1 — $n=3{,}8$–4 Гц; *2* — $n=5{,}5$ Гц; *3* — $n=5{,}4$ Гц

циентом лобового сопротивления и преобладающей частотой отрыва вихрей (рис. 19).

Для неподвижного цилиндра частота отрыва вихрей определяется числом Струхаля

$$\mathrm{Sh} = \frac{nd}{v}, \tag{145}$$

где n — частота отрыва вихрей. Зависимость числа Струхаля от чисел Рейнольдса показана на рис. 19.

Важной особенностью вихревого возбуждения гибких цилиндров является возникновение интенсивных колебаний поперек потока в определенных интервалах скоростей. В этих интервалах наблюда-

ются скорости (именуемые критическими), для которых частоты вихрей Бенара — Кармана, определяемые числом Струхаля (145), близки к собственным частотам колебаний цилиндра.

Натурные и модельные испытания круговых цилиндров [2, 14, 46, 71, 74, 78] показывают, что колебания таких тел вдоль и поперек потока происходят со случайной амплитудой и фазой и с частотой, близкой к собственной частоте колебаний в данном направлении. Сложение этих двух взаимно перпендикулярных колебаний дает траекторию, близкую к эллипсу, большая ось которого перпендикулярна направлению потока.

Такой характер колебаний цилиндра указывает на случайную природу действующих на него аэродинамических сил.

Из графиков на рис. 20 видно, что колебания цилиндра поддерживаются энергией потока даже при малых скоростях. С увеличением скорости потока растут и амплитуды колебаний цилиндра. Это наблюдается как при ламинарном, так и при турбулентном обтекании ($Re > Re_{кризиса}$). В области падения лобового сопротивления (кризиса сопротивления) наблюдается значительное уменьшение амплитуд поперечных колебаний цилиндра.

При определенных скоростях потока происходит захват частоты вихрей Бенара — Кармана собственной частотой колебаний цилиндра и амплитуды его начинают расти. Это явление, называемое иногда ветровым резонансом, носит автоколебательный характер [2, 14, 74] и вызвано аэродинамической (золовой) неустойчивостью цилиндра, которая возникает при критической скорости ветра, когда отрицательное аэродинамическое демпфирование преобладает над положительным демпфированием, обусловленным внутренним трением в цилиндре.

Аэродинамическое демпфирование. Силу аэродинамического демпфирования [78] обычно представляют в виде двух слагаемых, из которых первое действует в фазе с движением и пропорционально перемещению системы, второе сдвинуто относительно движения на $\pi/2$ и пропорционально скорости колебаний

$$F_a(t) = H_a y + K_a \dot{y}; \quad y = y_0 e^{i\omega t}. \tag{146}$$

Безразмерные величины от y, H_a и K_a записываются в таком виде:

$$\eta = \frac{y}{d}; \quad h_a = \frac{H_a}{\rho d^2 n^2} \text{ и } k_a = \frac{K_a}{\rho d^2 n}.$$

Для выяснения поведения сооружения в натуре могут использоваться значения h_a и k_a, полученные в модельных испытаниях при соответствующих приведенной скорости и безразмерной амплитуде.

Для системы с одной степенью свободы

$$h_a = \frac{4\pi^2\mu}{\rho d^2}\left(1 - \frac{n_0^2}{n^2}\right); \quad k_a = \frac{2\mu\delta_a}{\rho d^2}. \tag{147}$$

Здесь μ — масса единицы высоты сооружения; n и n_0 — частота колебаний в потоке ветра и в вакууме; ρ — плотность воздуха; δ_a — логарифмический декремент, соответствующий аэродинамическому возбуждению; d — характеристический размер сооружения.

Для большинства сооружений ветер оказывает слабое влияние на частоту колебаний. В этом случае $n \approx n_0$, и первым слагаемым в (146) можно пренебречь. Параметр k_a при втором слагаемом

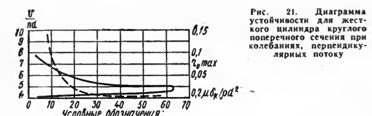


Рис. 21. Диаграмма устойчивости для жесткого цилиндра круглого поперечного сечения при колебаниях, перпендикулярных потоку

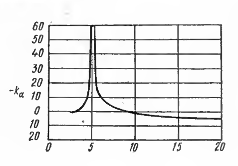


Рис. 22. Зависимость аэродинамического возбуждения цилиндра от приведенной скорости, для $\eta_0=0{,}01$ при $Re=1{,}2\cdot 10^5$

зависит от формы поперечного сечения, от приведенной скорости, от амплитуды колебаний и от числа Рейнольдса.

Если параметр k_a положителен, то коэффициент диссипации энергии при действии силы аэродинамического демпфирования γ_a снижает амплитуду колебаний. В тех случаях когда значение γ_a отрицательно, так что $\gamma_{сумм}$ становится отрицательным, в сооружении наблюдаются нарастающие колебания. Отрицательное аэродинамическое демпфирование рассматривается в данном случае как аэродинамическое возбуждение.

Диаграмма устойчивости для жесткого цилиндра круглого поперечного сечения при колебаниях, перпендикулярных ветровому потоку, представлена на рис. 21. Из диаграммы видно, что максимальные амплитуды возникают при приведенной скорости $v_r = \frac{v}{nd} = 5$ для любых значений конструкционного демпфирования.

Зависимость параметра k_a от v_r показана на рис. 22. Максимальное значение k_a соответствует $v_r=5$, но и при $4<v_r<9{,}5$ возбуждение становится отрицательным. В указанных пределах v_r параметр k_a зависит от амплитуды η_0. При очень малых амплитудах k_a возрастает.

Скрутон [78] показал, что при $v_r=5$ зависимость k_a от η_0 соответствует гиперболическому соотношению

$$k_a\,\eta_0 = 0{,}55. \tag{148}$$

Связь между величиной $k_a \eta_0$ и коэффициентом поперечной силы C_y имеет вид $C_y = -\frac{4\pi k_a \eta_0}{v_r^2} = 0{,}27$. Это значение соответствует $\mathrm{Re} \approx 10^5$.

Систематические сведения о параметре k_a, включая влияние амплитуды, приведенной скорости и чисел Рейнольдса, могут быть получены непосредственным измерением возбуждения при свободных и вынужденных колебаниях конструкции. Если известны для некоторых скоростей максимальные амплитуды, то используя выражение $(\gamma_a + \gamma_k)\eta_* = 0$ и диаграмму устойчивости, можно также получить данные о параметре k_a.

Влияние формы поперечного сечения, параметров конструкции и потока ветра [74]. Все поперечные сечения имеют характеристические числа Струхаля, изменяющиеся в зависимости от положения сечения по отношению к направлению потока и от числа Рейнольдса.

Для сечений с угловыми точками число Струхаля слабо зависит от чисел Рейнольдса, точки отрыва потока фиксированы и совпадают с угловыми. Вихреобразование будет хорошо коррелировано по пролету, так что возбуждение будет сильным и более согласованным, чем в случае круглого сечения, в котором отрыв потока будет определяться числом Рейнольдса.

Важным параметром формы поперечного сечения является длина тела в направлении потока, а также форма части сечения, расположенной ниже точек отрыва, поскольку эта кормовая часть является частью конструкции, непосредственно подвергающейся вихревому возбуждению. Длинная кормовая часть либо мешает вихреобразованию в следе, либо способствует присоединению отделившегося потока к поверхности, а затем новому отрыву вниз по потоку.

В любом случае этот параметр оказывает непосредственное влияние на число Струхаля.

Число Рейнольдса является важной характеристикой круглых сечений, где как число Струхаля, так и размер кормовой части определяется движением точек отрыва в зависимости от Re.

Установлено [74], что в тех случаях когда конструкционное демпфирование мало и имеют место колебания большой амплитуды, число Струхаля 0,2 наблюдается при всех числах Re.

Турбулентный поток и изменение скорости с высотой существенно влияют на колебания при вихревом возбуждении: 1) эффективная частота вихрей изменяется по высоте цилиндра в зависимости от градиента средней скорости; 2) турбулентный поток нарушает регулярность распространения вихрей; 3) корреляция вдоль цилиндра нарушается градиентом скорости и турбулентности. Вследствие этого аэродинамические силы становятся случайными и менее эффективными.

В настоящее время в лучшем случае может быть качественно описана взаимозависимость турбулентности и вихревого возбуждения. Количественная оценка этого эффекта может быть сделана на основании экспериментальных данных.

Теоретический анализ вихревого возбуждения. Этой задаче посвящено много исследований [2, 14, 21, 31, 33, 60, 82]. В настоящее время мы еще не располагаем достаточно обоснованной теоретической моделью этого явления.

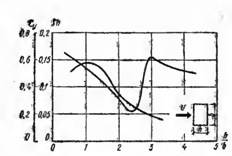


Рис. 23. Число Струхаля и коэффициенты поперечной силы c_y для прямоугольного сечения в зависимости от отношения h/b

Анализ отделившегося потока вокруг колеблющихся тел все еще остается полуэмпирическим. Это обусловлено непригодностью схематических моделей для описания характеристик следа, определяемого телом и его движением.

Имеющаяся аэродинамическая информация о возникающих при действии ветра колебаниях плохо обтекаемых тел является в основном эмпирической, так что основным инструментом исследователя является испытание аэроупругих моделей, а анализ колебаний включает установленное эмпирическим путем возбуждение динамической системы.

Для определения природы и величины возмущающей силы, действующей при отрыве вихрей, выполнены обширные экспериментальные исследования, которые в настоящее время еще не завершены, и оценки величины этой силы приходится делать по приближенным зависимостям.

Общепринято величину интенсивности поперечной силы принимать равной

$$F = c_y\,(\mathrm{Re},\,\mathrm{Sh},\,t)\,\frac{\rho v^2}{2}\,d. \tag{149}$$

Приведенные в литературе значения коэффициента поперечной силы c_y для кругового цилиндра в большинстве случаев получены не на основе непосредственного измерения поперечной силы в гладком потоке.

В главе СНиП II-6-74 коэффициент поперечной силы c_y для закризисной области чисел Рейнольдса принят равным 0,25. Он соответствует полученному в экспериментах значению c_y, умноженному на коэффициент 0,8, учитывающий вероятность возникновения плоскопараллельного потока ветра по высоте сооружения. По Фыну [62], стандарт $c_y = 0{,}14$, Скрутон [78] получил для c_y значение 0,27 при $\mathrm{Re} = 10^5$, по Накагаве, $c_y = 0{,}25$—$0{,}27$.

Значения чисел Sh и поперечной силы c_y для призмы с прямоугольным поперечным сечением, рекомендуемые проектом стандарта по ветровым нагрузкам ИСО, приведены на рис. 23.

Поперечные колебания цилиндра в потоке ветра [2]. Выше уже указывалось, что явление резонанса, наблюдаемое при колебаниях цилиндра в потоке ветра, может быть объяснено при рассмотрении цилиндра как автоколебательной системы. В системе цилиндр — ветровой поток следует различать: основную колебательную систему — цилиндр; усилитель колебаний — вихри, возникающие при

обтекании цилиндра потоком; ограничитель нарастания колебаний — характеристика затухания в системе.

Колеблющийся цилиндр — это элемент системы, задающий частоту автоколебаний. При отсутствии ветра цилиндр способен совершать только затухающие собственные колебания.

Вихри связывают основную колебательную систему с источником энергии — ветровым потоком. При этом колебания цилиндра влияют на образование вихрей, навязывая свой период процессу в обтекающем потоке. Такого рода обратное воздействие, характерное для всякой автоколебательной системы, носит название обратной связи.

Таким образом, установившийся режим в системе цилиндр — поток предопределяется скоростью потока и характеристикой затухания колебаний цилиндра.

Жесткий консольный цилиндр на упругой опоре. Уравнение движения такой системы с одной степенью свободы имеет вид

$$J\ddot{\varphi} + \beta\dot{\varphi} + c\varphi = \frac{F_0 l^2}{3} f(t) = M, \tag{150}$$

где φ — угол поворота опоры цилиндра; β — характеристика затухания; $J=\mu(b^2+r^2)$ — момент инерции массы цилиндра относительно опоры (b — расстояние от центра тяжести цилиндра до опоры); r — радиус инерции массы цилиндра относительно оси, проходящей через центр тяжести; F_0 — амплитуда силы $F(x, t)$ у свободного конца цилиндра; график этой силы представлен на рис. 24; M — момент в сечении у основания цилиндра аэродинамических сил, распределенных по высоте цилиндра по закону треугольника. Здесь принято, что распределение этих сил с точностью до постоянного множителя совпадает с его первой собственной формой колебаний.

Отметим, что в этой задаче момент M явно не зависит от времени и является функцией положения и скорости колебаний самого цилиндра $M=M(\varphi, \dot{\varphi})$. Знак момента зависит от значения $\dot{\varphi}$ ($M>0$ при $\dot{\varphi}>0$ и $M<0$ при $\dot{\varphi}<0$). Пространственное графическое изображение функции $M(\varphi, \dot{\varphi})$ приведено на рис. 24. Ясно, что функция $M(\varphi, \dot{\varphi})$ нелинейна, следовательно, уравнение (150) является нелинейным дифференциальным уравнением.

Для приближенного решения задачи использован метод, разработанный в [44].

Пусть
$$\varphi = -\varphi_0 \cos \omega t, \tag{151}$$

где амплитуда φ_0 для установившегося автоколебательного режима постоянна, а частота автоколебаний ω может быть отличной от частоты ω_0, соответствующей консервативной системе.

Разложим момент M в ряд Фурье

$$M = \frac{4M_0}{\pi}\left(\sin \omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} \cdots\right), \tag{152}$$

$$\text{где } M_0 = F_0 l^3/3.$$

Ограничимся в выражении (152) первым членом разложения.

Первая гармоника момента M совпадает по фазе со скоростью $\dot{\varphi}$, т. е. запаздывает относительно угла поворота цилиндра φ на $\pi/2$. При этом условии момент совершает наибольшую работу, и отсутствует влияние обратной связи на период колебаний цилиндра. Примерные графики F_0, φ и $\dot{\varphi}$ приведены на рис. 24.

Из сказанного следует, что колеблющийся в ветровом потоке цилиндр можно рассматривать как систему, в которой в силу определенных физических причин наряду с обычными упругими силами действует квазиупругие силы $F(x, t)$, запаздывающие относительно изменения φ на $\pi/2$.

Окончательное выражение для уравнения (150) будет иметь вид

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = \left(\omega^2 - \omega_0^2\right) \varphi + \left[\frac{4M_0}{J\pi\varphi_0\omega} - \gamma\omega\right] \dot{\varphi} =$$
$$= P(\varphi_0, \omega) \cos \omega t + Q(\varphi_0, \omega) \sin \omega t, \qquad (153)$$
$$\text{где } \dot{\varphi} = \varphi_0 \omega \sin \omega t.$$

Для установившегося режима получаем систему уравнений:

$$P(\varphi_0, \omega) = 0; \quad Q(\varphi_0, \omega) = 0,$$

откуда следует $(\omega^2 - \omega_0^2)\ \varphi_0 = 0$, или $\omega = \omega_0$, т. е. в первом приближении частота автоколебаний совпадает с частотой собственных колебаний системы

$$\varphi_0 = \frac{4M_0}{c\delta}; \quad c = J\omega^2. \qquad (154)$$

Упругий цилиндрический стержень. Учитывая для стержня только первую собственную форму колебаний $\alpha_1(z)$, можно его перемещения записать в таком виде:

$$y(z, t) = \alpha_1(z)\, p_1(t), \qquad (155)$$

где $p_1(t)$ — обобщенная координата.

Тогда уравнение движения в обобщенных координатах будет иметь вид

$$\ddot{p}_1(t) + \gamma\omega_1 \dot{p}_1(t) + \omega_1^2 p_1(t) = \frac{Q_1(t)}{M_1}. \qquad (156)$$

Здесь ω_1 — первая собственная круговая частота колебаний стержня;

обобщенная сила $Q_1(t) = \int\limits_0^H F(z, t) \times \alpha_1(z)\, dz$; (157)

обобщенная масса $M_1 = \mu \int\limits_0^H \alpha_1^2(z)\, dz$.

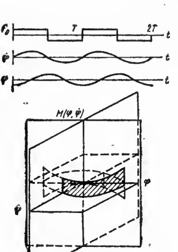


Рис. 24. График функции $M(\varphi, \dot{\varphi})$

Примем, как и для жесткого цилиндра на упругой опоре,

$$F(z, t) = \frac{4}{\pi} F_0 \alpha_1(z) \sin \omega t,$$

где ω — частота колебаний силы $F(z, t)$; F_0 — ордината эпюры аэродинамической силы у свободного конца консоли.

Повторяя для уравнения (156) рассуждения, приведенные выше при решении уравнения (150), получим для перемещения конца стержня следующее выражение:

$$y_0 = \frac{\pi}{\delta} \frac{4F_0}{\pi \mu \omega_1^2} = \frac{4}{\delta} y_0^c, \tag{158}$$

где $y_0^c = \dfrac{F_0}{\mu \omega_1^2}$ — прогиб верхнего конца стержня от статически приложенных аэродинамических сил.

Упругий стержень, имеющий форму усеченного конуса. Эксперименты Рошко [77], Чинкотта [52] показали, что за кризисом сопротивления при числах Рейнольдса $1{,}4 \cdot 10^6$—$3{,}5 \cdot 10^6$ действующая на цилиндр поперечная сила случайна и имеет непрерывный спектр, при Re от $3{,}5 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^6$ процесс имеет узкополосный спектр, выше $Re = 6 \cdot 10^6$ до $Re = 1{,}8 \cdot 10^7$ процесс случайный, но содержит периодическую составляющую (см. рис. 19).

Используя эти эксперименты, Фын [62] рассматривает задачу о поперечных колебаниях цилиндра как задачу о вынужденных колебаниях упругого стержня, возбуждаемого случайной поперечной силой.

Поведение упругого стержня, имеющего форму усеченного конуса, рассмотрено в работе [82].

Было установлено, что максимальная реакция при колебаниях по основной форме получается тогда, когда частота срыва вихрей, соответствующих диаметру на уровне, равном 2/3 высоты стержня, совпадает с его собственной частотой. При более высоких скоростях могут при вихревом возбуждении возникнуть одновременно первая и вторая формы собственных колебаний. Перемещение такого стержня

$$y(z, t) = \sum_{i=1}^{s} p_i(t) \, \alpha_i(z). \tag{159}$$

Тогда уравнение движения в обобщенных координатах будет иметь вид (156). Обобщенная масса $M_i = \int_0^H \mu(z) \, \alpha_i^2(z) dz$. Обобщенная сила $Q_i(t) = \int_0^H q(z, t) \alpha_i(z) dz$. Здесь $q(z, t)$ — интенсивность поперечной силы; $\alpha_i(z)$ — i-ая форма собственных колебаний стержня. Спектральную плотность обобщенной силы $Q_i(t)$ можно записать в таком виде

$$S_{Q_i}(t) = \int_0^H \int_0^H \sqrt{S_q(z_h, n) \, S_q(z_m, n)} \, R(r) \, \alpha_i(z_h) \, \alpha_i(z_m) \, dz_h \, dz_m. \tag{160}$$

Следуя [82], для эмпирического энергетического спектра интенсивности поперечной силы примем следующее выражение:

$$S_q(n) = \frac{\sigma^2_{c_y}}{\sqrt{\pi}\, b_5 n_5} \exp\left[-\frac{\left(1 - n/n_S\right)^2}{B_S^2}\right], \tag{161}$$

Здесь средний квадрат коэффициента поперечной силы $\sigma^2_{c_y} = \dfrac{\sigma_q^2}{0,5\rho d \overline{v}^2}$;

$B_S = \dfrac{\sigma^2_{c_y}}{\sqrt{\pi}\, n_S\, S_q(n)}$ — относительная ширина спектра; n_S — частота, соответствующая пику энергетического спектра $S_q(n)$; n — текущая частота, Гц.

Нормированный коэффициент пространственной корреляции

$$R(r) = \cos\frac{2r}{3} \exp\left[-\left(\frac{r}{3}\right)^2\right], \tag{162}$$

где $r = \dfrac{2\,|z_k - z_m|}{d(z_к) + d(z_m)}$, $d(z_k)$ и $d(z_m)$ — диаметры стержня в точках k и m.

Подставляя в (160) выражения (161) и (162), получим

$$S_{Q_i}(n) = \int_0^H \int_0^H \left\{\sigma_q\, \alpha_i \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{1 - n/n_S}{B_S}\right)^2\right]\right\}_k \times$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{n_{Sk}\, n_{Sm}}\, B_S \sqrt{\pi}} \times$$

$$\times \left\{\sigma_q\, \alpha_i \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{1 - n/n_S}{B_S}\right)^2\right]\right\}_m \cos\frac{2r}{3} \exp\left[-\left(\frac{r}{3}\right)^2\right]. \tag{163}$$

Пренебрегая взаимной корреляцией между собственными формами колебаний консольного стержня, средний квадрат его перемещений можно записать в таком виде:

$$\sigma_y^2(z) = \sum_{i=1}^{s} \overline{p_i^2(t)}\, \alpha_i^2(z), \tag{164}$$

$$\text{где}\ \overline{p_i^2(t)} = \frac{\pi L}{\gamma\beta}\left(\frac{\sigma_{c_y}\, \rho d^4\, \alpha_i(z)}{8\pi^2 \mathrm{Sh}^2 M_i}\right)^2. \tag{165}$$

Расчетное значение обобщенной координаты, соответствующее 2-й собственной форме колебаний трубы, приведено в п. 7.9.

В случае стержня с малой коничностью или кругового цилиндра можно пренебречь изменением частоты отрыва вихрей по высоте

стержня и получить следующее приближенное выражение для среднего квадрата обобщенной координаты:

$$\overline{p_i^2(t)} = \left(\frac{\sigma_c \rho D^4}{8\pi^2 \mathrm{Sh}^2 M_{\text{эфф}}}\right)^2 \frac{\pi L\lambda}{2B\eta} K^3 \exp\left[-\left(\frac{1-K^{-1}}{B_S}\right)^2\right], \quad (166)$$

где $M_{\text{эфф}} = \dfrac{H\int\limits_0^H \mu(z)\,\alpha^2(z)\,dz}{\int\limits_0^H \alpha^2(z)\,dz}$; $\lambda = \dfrac{H}{d}$; $v_{\text{крит}} = \dfrac{n_0 d}{\mathrm{Sh}}$;

$$\frac{\overline{v}}{v_{\text{крит}}} = \frac{n_S}{n_0} = K.$$

Галопирование гибких призматических конструкций. Как уже отмечалось выше, явление галопирования, которое возникает в гибких призматических конструкциях при определенных скоростях ветра, связано с аэроупругой неустойчивостью таких тел. Колебания такого типа возникают в плоскости, перпендикулярной к направлению ветра, и сохраняют свою интенсивность даже при значительной турбулентности набегающего потока. Это явление аэродинамического возбуждения изучали на основе квазистационарной модели Ден-Гартог [21], Паркинсон [73], Новак и Давенпорт [70, 72].

Напомним, что в квазистационарной модели явления мгновенные аэродинамические силы, действующие на колеблющееся в потоке ветра тело, принимаются такими же, как для неподвижного тела, обтекаемого потоком с относительной скоростью, равной геометрической сумме скорости установившегося потока и скорости поперечных колебаний системы.

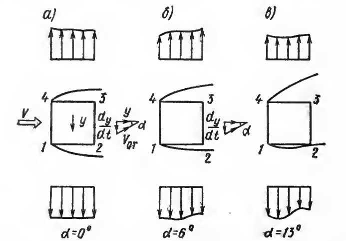
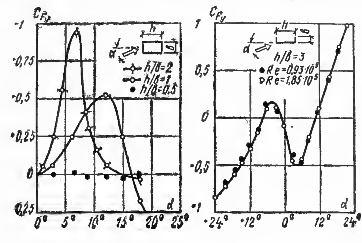


Рис. 25. Обтекание квадратного сечения в условиях покоя и в условиях поперечного движения при ветре, перпендикулярном плоскости движения

В настоящее время мало экспериментальных и теоретических исследований этого явления, поэтому мы рассмотрим здесь только такие вопросы: 1) галопирующие колебания призм в гладком потоке ветра [70]; 2) особенности решения этой задачи для турбулентного потока.

Особенности явления галопирования [74]. Это явление возникает при формах поперечного сечения, имеющих фиксированные точки отрыва. Как и при вихревом возбуждении, частоты галопирующих



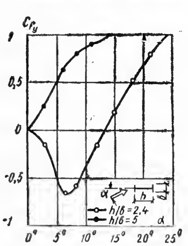


Рис. 26. Коэффициент c_{F_y} для прямоугольного сечения, швеллера и двутавра

колебаний близки к собственным.

Если при вихревом возбуждении интенсивные колебания возникают в определенных интервалах скоростей ветра, то галопирование происходит при всех скоростях выше критических, определяемых конструкционным демпфированием.

На рис. 25 показано квадратное сечение в условиях покоя и в условиях поперечного движения при ветре, перпендикулярном плоскости движения. На рис. 25, *б* тело смещается вниз со скоростью dy/dt, при этом относительная скорость $v_{от}$ направлена под углом атаки $\alpha=6°$. Поток по-прежнему отрывается по углам 1 и 4, однако отделившиеся пограничные слои асимметричны, слои с на-

ветреииой стороны располагаются ближе к стороне 1—2, а слой с заветреииой стороны к стороие 3—4. В результате сторона 1—2 испытывает бо́льший отсос, чем сторона 3—4, и в направлении движения возникает сила F_y. На рис. 25, *в* угол α увеличивается до 13°, а с наветреиной стороны при угле 2 вновь происходит присоединение потока, F_y при этом угле достигает максимального значения.

Характер обтекания, показанный на рис. 25, свидетельствует о том, что повторное присоединение отделившегося потока к поверхности кормовой части является важной характеристикой явления галопирования.

Как это видно на рис. 26, при малом отношении сторон прямоугольного сечения h/b не возникает поперечной силы, сечение будет устойчивым в состоянии покоя.

Галопирование призм в гладком потоке [70]. Если призма колеблется со скоростью $\dot{y}$ поперек потока, имеющего скорость v, то относительная скорость $v_{от}$ вызывает аэродинамическую силу F, определяемую лобовым сопротивлением и поперечной силой.

Составляющая сила F в направлении движения равна

$$F_y = \frac{1}{2}\rho b h v_{от}^2 c_{F_y}, \tag{167}$$

где $v_{от} = v \sec\alpha$, $\alpha = \operatorname{arctg}(\dot{y}/v)$;

$$c_{F_y} = -(c_y + c_x \operatorname{tg}\alpha)\sec\alpha, \tag{168}$$

b — ширина наветренной стороны призмы; h — ее высота; c_x и c_y — коэффициенты лобового сопротивления и поперечной силы конструкции; ρ — плотность воздуха.

Уравнение движения призмы, рассматриваемой как система с одной степенью свободы, можно записать в таком виде:

$$\ddot{y} + \omega_1^2 y = \frac{F_y}{M} - \gamma_k \omega_1 \dot{y}; \quad \left(\gamma_k = \frac{\delta_k}{\pi}\right), \tag{169}$$

где ω_1 — собственная круговая частота системы; γ_k — коэффициент диссипации энергии конструкции.

Из выражения (169) следует, что если $c_{F_y} > 0$, то при $\alpha > 0$ в системе возбуждаются колебания.

Первая производная коэффициента c_{F_y} при $\alpha = 0$

$$A_1 = \left(\frac{dc_{F_y}}{d\alpha}\right)_{\alpha=0} = -\left(\frac{dc_y}{d\alpha} + c_x\right). \tag{170}$$

Условие $A_1 > 0$ (критерий Ден-Гартога) есть необходимое условие для возбуждения колебаний. Однако это условие не является достаточным, так как суммарный коэффициент диссипации энергии зависит также от положительного конструкционного демпфирования.

На рис. 26 показано изменение c_{F_y} в зависимости от угла атаки для призм с квадратным и прямоугольным поперечными сечениями, а также для швеллера и двутавра.

Экспериментальную зависимость коэффициента поперечной силы от угла атаки можно приближенно аппроксимировать полиномом вида (39) Руководства.

Таблица 13

Коэффициенты c_i

Тип конструкции	Собственные формы колебаний	Уравнение формы колебаний	Случаи	$k(z)$	c_1	c_2	c_3	c_5	c_7
Жесткая призма на упругой опоре	O H 1	1	1а	1	1	1	1	1	1
			1в	$\left(\frac{z}{10}\right)^{1/6}$	$\frac{6}{7}$	1	$\frac{6}{5}$	2	6
Призматический стержень, струна	O H n=2 n=1 1	$\sin\frac{n\pi}{H}z$	2	1	1	$\frac{8}{3\pi}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{35}{64}$
Жесткая призматическая консоль на упругой опоре	O H 1	$\frac{z}{H}$	3а	1	1	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{3}{7}$	$\frac{1}{3}$
			3в	$\left(\frac{z}{10}\right)^{1/6}$	$\frac{18}{19}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{18}{29}$	$\frac{18}{39}$	$\frac{18}{49}$
			3с	$\left(\frac{z}{10}\right)^{1/3}$	$\frac{9}{10}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{9}{14}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{9}{22}$
Упругая призматическая консоль с распределенной массой	O H 1	$\frac{z^2}{H^2}$	4а	1	1	$\frac{5}{7}$	$\frac{5}{9}$	$\frac{5}{13}$	$\frac{5}{17}$
			4в	$\left(\frac{z}{10}\right)^{1/6}$	$\frac{30}{31}$	$\frac{5}{7}$	$\frac{30}{53}$	$\frac{10}{25}$	$\frac{30}{97}$
			4с	$\left(\frac{z}{10}\right)^{1/3}$	$\frac{15}{16}$	$\frac{5}{7}$	$\frac{15}{26}$	$\frac{5}{12}$	$\frac{15}{46}$

Подставляя формулу (171) в уравнение (169), получим

$$\ddot{y}+\omega_1^2 y+2\left(\frac{\gamma_k\,\omega_1}{2}-\frac{n_M}{b}vA_1\right)\dot{y}+2\frac{n_M}{b}\sum_{i=3}^{m}\frac{\pm A_i\dot{y}^i}{v^{i-2}}=0, \quad (171)$$

где параметр массы $n_M=\dfrac{\rho b^2H}{4M}$; ρ — плотность воздуха; M — масса конструкции.

Знаки для A_i изменяются начиная с $+A_3$, $A_i>0$.

При $\alpha\to 0$ влияние членов, содержащих степени $\dot{y}$, исчезает, и характер начинающегося движения зависит только от знака коэффициента $\dot{y}$, т. е. от значения суммарного коэффициента диссипации энергии. Если этот коэффициент положителен, то нулевое положение устойчиво. Если он отрицателен, то нулевое положение неустойчиво и уравнение (171) описывает самовозбуждающие колебания.

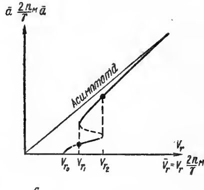
Для системы с распределенными параметрами безразмерные амплитуды $\bar{a}=a/b$ определяются из алгебраического уравнения (п. 7.17).

Коэффициенты c_i и A_ic_i приведены в табл. 13 и 14.

Характер изменения реакции аэродинамически неустойчивой конструкции (призмы) показан на рис. 27. Как это видно, конструкция остается практически неподвижной, пока скорость ветра не достигнет критической приведенной скорости $v_{r\,\text{крит}}$.

Дальнейшее увеличение скорости ветра переходит в интенсивные поперечные колебания. Каждой скорости соответствуют стационарные колебания, которые с увеличением скорости приближаются к асимптоте, проходящей через начало координат. Асимптота соответствует коэффициенту диссипации энергии $\gamma_\text{к}=0$.

Скорости v_{r1} и v_{r2} определяют границы, в пределах которых могут происходить бифуркация или колебательный гистерезис. Теоретический анализ [70] показывает, что для всех конструкций, имеющих определенный вид поперечного сечения, одинаковы собственные формы,



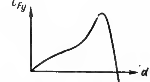


Рис. 27. Универсальная кривая реакции и соответствующий ей коэффициент поперечной силы

$$c_{F_y}=A_1\left(\frac{\dot{y}}{v}\right)-A_3\left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^3+A_5\times$$
$$\times\left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^5-A_7\left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^7$$

Таблица 14

Случай	$A_i\ c_i$			
	$A_1\ c_1$	$A_3\ c_3$	$A_5\ c_5$	$A_7\ c_7$
1а	2,69	168	6 270	59 900
1в	2,31	202	12 540	369 400
2	2,69	126	3 919	32 758
3а	2,69	101	2 687	1 997
3в	2,55	104,28	2 894	22 004
4а	2,69	93,33	2 411	17 617
4в	2,6	95,09	2 508	18 526

но произвольную массу и затухание, стационарные амплитуды могут быть описаны универсальной кривой в плоскости $\bar{a}\ \frac{2n_M}{\gamma}\ x \times v_r \frac{2n_M}{\gamma}$ (рис. 28); координаты кривой не зависят от аэродинамических постоянных поперечных сечения конструкции.

Этот факт позволяет построить универсальную кривую реакции конструкции экспериментально на основе измеренных стационарных амплитуд колебаний аэроупругой модели, не определяя при этом аэродинамические постоянные поперечного сечения.

Аэроупругая неустойчивость призм в турбулентном потоке [72]. Эта задача, как и приведенная выше, рассматривается в квазистационарном режиме.

Представим продольную компоненту скорости ветра в виде

$$v = \bar{v} + v'(t), \tag{172}$$

тогда уравнение движения прямоугольной призмы как системы с одной степенью свободы будет иметь вид

$$\ddot{y} + \omega_1^2 y + 2\left\{\frac{\gamma_k \omega_1}{2} - \frac{n_M}{b}\left[\bar{v} + v'(t)\right] A_1\right\}\dot{y} + + \frac{2n}{b}\sum_{i=3}^{m}\frac{\pm A_i \dot{y}^i}{\left[\bar{v} + v'(t)\right]^{i-2}} = \frac{1}{M}\left(F_п(t) + F_b(t)\right), \tag{173}$$

где $F_п(t)$ и $F_b(t)$ — случайные силы, учитывающие воздействие на призму поперечной компоненты пульсации скорости и аэродинамической силы, возникающей при вихревом возбуждении.

Уравнение (173) является неоднородным нелинейным дифференциальным уравнением с переменными во времени коэффициентами. Малость пульсации продольной компоненты скорости $v'(t)$ по сравнению с ее средним значением $\bar{v}$ и случайный характер пульсации позволяют считать, что явление динамической неустойчивости (параметрического резонанса) в этой системе проявится слабо. Поэтому при анализе явления галопирования этот вопрос может не рассматриваться.

Следует отметить, что в турбулентном потоке среднее время $T_{ср}$, в течение которого призма неустойчива, изменяется непрерывно в зависимости от отношения $v_{кр}/\overline{v}$. Поэтому в таком потоке тенденция к появлению поперечных колебаний существует и при средних скоростях, меньших критической скорости. По той же причине критическая скорость ветра не может быть так четко выражена, как в гладком потоке. Учитывая это, можно считать, что практическое влияние пульсации скорости на устойчивость призмы обычно меньше, чем влияние средней скорости потока.

Отсюда следует, что в левой части уравнения (173) можно пренебречь влиянием пульсации скорости на аэродинамическое демпфирование системы.

Упрощенное уравнение движения призмы будет иметь вид (171).

Однако между этими уравнениями имеется существенное различие. В гладком потоке колебания не возникают при скорости потока, меньше критической, если не считать колебаний, возникающих при вихревом возбуждении. В турбулентном потоке поперечные колебания возникают даже в устойчивой области, так как общее эффективное демпфирование системы уменьшается за счет отрицательного аэродинамического демпфирования в призмах, имеющих аэродинамические неустойчивые поперечные сечения.

Таким образом, для решения задачи о колебаниях типа галопирования в турбулентном потоке необходимо знать спектральные плотности и взаимные спектральные плотности пульсации поперечной компоненты скорости и аэродинамических сил при вихревом возбуждении. Коэффициенты разложения A_i должны быть определены для турбулентного потока.

В настоящее время еще мало экспериментальных данных для построения статистических характеристик аэродинамических сил, действующих на конструкцию при галопировании, поэтому определение этих сил следует проводить как для установившегося потока.

Расчет конструкций, для которых квазистационарная модель не может быть использована, должен проводиться на основе данных испытаний аэроупругих моделей.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ И ФОРМ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СООРУЖЕНИЙ И ЗДАНИЙ

Аналитические методы. При определении частот и форм собственных колебаний здания и сооружения рассматриваются обычно как системы с конечным числом степеней свободы.

Движение такой системы описывается системой дифференциальных уравнений, имеющих в форме метода сил вид

$$\sum_{k=1}^{r} \delta_{jk} M_k \ddot{y}_k(t) + y_j(t) = 0, \ (j = 1, 2, \ldots, k, \ldots, r).$$

Здесь M_k — сосредоточенные массы; δ_{jk} — перемещение j-ой массы от единичной силы, приложенной к k-ой массе; y_j и y_k — перемещения масс M_j и M_k.

Круговые собственные частоты системы ω_i определяются по формуле $\omega_i = 1/\sqrt{\varphi_i}$, где φ_i — убывающие по величине корни частотного уравнения

$$\begin{vmatrix} M_1\delta_{11}-\varphi & M_2\delta_{12} & \ldots & M_r\,\delta_{1r} \\ M_1\delta_{21} & M_2\delta_{22}-\varphi & \ldots & M_r\,\delta_{2r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ M_1\delta_{r1} & M_2\delta_{r2} & \ldots & M_r\,\delta_{rr}-\varphi \end{vmatrix} \qquad (174)$$

Раскрытие определителя (174) приводит к уравнению r-ой степени относительно φ

$$\varphi^r - A_1\varphi^{r-1} + A_2\varphi^{r-2} + \ldots + (-1)^r A_r = 0.$$

Формы собственных колебаний системы определяются с точностью до постоянного множителя в результате подстановки значений φ_i в какие-либо $r-1$ уравнений системы (например, в первые $r-1$ уравнений) и их решения

$$\left.\begin{array}{l} y_1(M_1\delta_{11}-\varphi)+y_2M_2\delta_{12}+ \ldots + y_r\,M_r\,\delta_{1r}=0 \\ y_1M_1\delta_{12} + y_2(M_2\,\delta_{22}-\varphi)+ \ldots + y_r\,M_r\,\delta_{2r}=0 \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ y_1M_1\delta_{1r} + y_2M_2\delta_{2r} + \ldots + y_r(M_r\,\delta r_r-\varphi)=0 \end{array}\right\} \qquad (175)$$

Коэффициенты распределения амплитуд i-ой собственной формы колебаний $\alpha_{ij}=y_{ij}/y_{ir}$. Если положить $y_{ir}=1$, то $y_{ij}=\alpha_{ij}$.

Уравнения движения системы в форме метода перемещений имеют вид

$$\sum_{k=1}^{r} c_{jk}\,y_k(t) + M_j\,\ddot{y}_j(t) = 0, \quad (j = 1,\ 2,\ \ldots,\ k,\ \ldots,\ r).$$

Здесь c_{ij} — реакция системы в точке, где находится масса, при единичном перемещении j-ой массы и закреплении всех остальных масс.

Квадраты круговых собственных частот системы являются корнями частотного уравнения

$$\begin{vmatrix} c_{11}-M_1\omega^2 & c_{12} & c_{13} & \ldots & c_{1r} \\ c_{21} & c_{22}-M_2\omega^2 & c_{23} & \ldots & c_{2r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{r1} & c_{r2} & c_{r3} & \ldots & c_{rr}-M_r\omega^2 \end{vmatrix} = 0.$$

Формы собственных колебаний определяются аналогично тому, как это показано при использовании метода сил. Собственные частоты и формы вращательных колебаний сооружения могут быть определены по формулам, приведенным выше, если вместо M_j всюду писать моменты инерции масс J_i, взятые относительно оси, проходящей через центр вращения перпендикулярно плоскости колебаний, а под δ_{jk} и c_{jk} понимать соответственно угол поворота сооружения в точке, где находится j-я масса, и реактивный момент в точке, где находится j-я масса, при единичном повороте k-ой массы и закрепления всех остальных масс.

Для решения частотных уравнений и определения частот и форм собственных колебаний применяются различные аналитические методы и стандартные программы вычислений собственных чисел и собственных векторов матриц на ЭВМ.

Для сооружений и зданий башенного типа допускается учитывать только первую частоту и форму собственных колебаний системы. В этом случае могут быть использованы приближенные методы определения собственных частот и форм, в частности, метод последовательных приближений и энергетический метод.

Метод последовательных приближений. Вес сооружения разбивают на ряд сосредоточенных грузов $P_1, P_2, \ldots, P_k, \ldots, P_r$. В качестве первого приближения для основной формы колебаний сооружения принимают параболу $y=f(z/H)^2$, где f — прогиб верхнего конца сооружения.

За второе приближение принимают изогнутую ось сооружения, нагруженного силами инерции, возникающими при колебаниях по первой форме. Изогнутая ось сооружения определяется методами строительной механики.

Приравнивая ординаты кривых первого и второго приближений для верхней точки сооружения, получают первое приближенное значение частоты собственных колебаний.

Продолжая указанный процесс, получают последовательность значений круговых собственных частот $\omega_1, \omega_2, \ldots$, которые будут стремиться к истинным значениям частоты. Обычно ограничиваются вторым приближением, которое дает значение частоты собственных колебаний с достаточной степенью точности.

Кривые первого и второго приближений для основной формы колебаний сооружения, эпюра изгибающих моментов от сил инерции и приведенные эпюры моментов инерции и изгибающих моментов показаны на рис. 28.

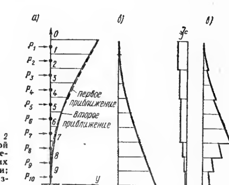


Рис. 28. *а* — кривые *1* и *2* приближений для основной формы колебаний сооружения; *б* — эпюра изгибающих моментов от сил инерции; *в* — приведенная эпюра изгибающих моментов

Энергетический метод. Период основного тона собственных колебаний сооружения в рассматриваемом направлении определяется по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{V}{\Pi}}, \qquad (176)$$

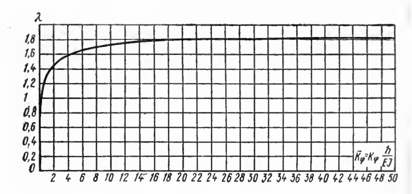


Рис. 29. График коэффициента частоты λ

где V — кинетическая энергия сооружения при колебаниях в данном направлении с данной амплитудой с единичной круговой частотой; Π — потенциальная энергия деформации сооружения при колебаниях в том же направлении с той же амплитудой.

Величины потенциальной и кинетической энергии для горизонтальных колебаний сооружения вычисляются по формулам:

$$V = \frac{1}{2g} \sum_{k=1}^{r} P_k\, y_k^2; \quad \Pi = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{r} P_k\, y_k.$$

Здесь P_k — вес массы k-го участка сооружения; y_k — горизонтальное перемещение k-ой точки оси сооружения в рассматриваемом направлении под действием сил $P_1 ... P_k ... P_r$ (r — число участков сооружения); g — ускорение силы тяжести. Горизонтальные перемещения y_k могут быть определены методами строительной механики.

Открытые этажерки и аппараты колонного типа. 1. Период основного тона колебаний открытой этажерки определяется по формуле (176). Здесь P_k — приложенная к плоскости k-го перекрытия горизонтальная сила, кН, равная весу массы перекрытия, включая все полезные нагрузки на перекрытие и полусумму веса всех стоек k-го и l-го этажей.

Если жесткость единицы длины ригелей рам этажерки в три раза превосходит жесткость единицы высоты стоек, то ригели могут считаться недеформируемыми и жестко связанными с вертикальными стойками.

В этом случае горизонтальные перемещения рамы y_k определяются по формуле

$$y_k = y_l + \frac{1}{\nu_k}\,(P_k + P_l + \ldots + P_r), \tag{177}$$

где $\nu_k = n\,\dfrac{12 E_c\, J_c}{h_k^2}$ — суммарная изгибная жесткость стоек k-го

этажа в заданном направлении силой, приложенной в плоскости k-го перекрытия, кН/м; n — общее число стоек в одном этаже, E_c — модуль упругости материала стойки этажерки, МПа; J_c — момент инерции поперечного сечения одной стойки k-го этажа, м^4; h_k — высота k-го этажа, м.

Перемещения y_k, вычисленные по формуле (177), могут быть приняты в качестве ординат первой формы собственных колебаний этажерки.

2. Период основного тона горизонтальных колебаний аппарата постоянного сечения по высоте, установленного на железобетонном фундаменте или на перекрытии открытой этажерки, определяется по формуле

$$T = \frac{2\pi H^2}{\lambda^2} \sqrt{\frac{\mu}{E_a J_a}}, \qquad (178)$$

где μ — масса единицы высоты аппарата, включая его изоляцию, т/м; H — высота аппарата, отсчитываемая от верха фундаментной плиты, м; E_a — модуль упругости материала оболочки аппарата, МПа; J_a — момент инерции поперечного сечения аппарата без изоляции, м^4; λ — коэффициент частоты (для аппарата, жестко заделанного в грунт, $\lambda = 1{,}875$).

В случае упругой заделки аппарата в грунт коэффициент частоты λ определяется по графику на рис. 30 в зависимости от относительного коэффициента жесткости

$$\bar{k}_\varphi = k_\varphi \frac{H}{E_a J_a},$$

где $k_\varphi = c_\varphi J_ф$ — коэффициент жесткости при упругом повороте подошвы фундамента относительно горизонтальной оси, кН/м; c_φ — коэффициент упругого неравномерного сжатия грунта $c_\varphi = 2c_z$.

Таблица 15

Нормативное давление на основание, МПа	Коэффициент упругого равномерного сжатия c_z, кН/м^3
0,1	20 000
0,2	40 000
0,3	50 000
0,4	60 000
0,5	70 000

Примечание. Промежуточные значения c_z определяются интерполяцией.

Расчетные значения коэффициентов упругого равномерного сжатия c_z для естественных оснований принимаются по табл. 15 в зависимости от величины нормативного давления, вычисленного по действующим нормам проектирования естественных оснований промышленных зданий и сооружений, которое соответствует ширине условного фундамента $b = 1$ м и глубине заложения его $h_ф = 2$ м,

$J_ф$ — момент инерции площади подошвы фундамента относительно его оси вращения.

Для свободно стоящего аппарата, установленного на перекрытии, угол поворота опорного сечения аппарата $1/k_ф$ от единичного момента определяется в зависимости от схемы расположения балок перекрытия в местах опирания на них аппарата.

Приведенная масса μ для случая, когда на аппарате имеются площадки, определяется по формуле

$$\mu = \mu_0 + \frac{1}{H_а} \sum_1^r k_s M_s,$$

где μ_0 — равномерно распределенная масса аппарата, включая его изоляцию; M_s — сосредоточенная масса площадки; r — число площадок; k_s — коэффициент приведения сосредоточенной массы M_s к равномерно распределенной. Значения k_s в зависимости от относительной абсциссы $\alpha_s = x_s/H$ приведены в табл. 16.

3. Относительные ординаты формы собственных колебаний $\alpha_1(x)$ и коэффициентов распределения амплитуд изгибающих моментов и поперечных сил $\alpha_2(x)$ и $\alpha_3(x)$ аппарата постоянного сечения, установленного на фундаменте или на перекрытии, определяются по табл. 17—19 в зависимости от коэффициента частоты λ.

4. Период основного тона собственных колебаний для ряда вертикальных аппаратов постоянного сечения, связанных по высоте горизонтальными площадками и установленных на общем или на отдельных фундаментах, может быть принят равным периоду собственных колебаний наиболее высокого аппарата в направлении, перпендикулярном оси ряда. При расчете такого аппарата ширина его фундамента принимается равной полусумме расстояний между соседними аппаратами.

Таблица 16

Значения k_s

Схема сооружения	α_s	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
[схема: x_s, h]	k_s	0	0	0	0,01	0,02	0,04	0,08	0,13	0,21	0,32

Продолжение табл. 16

0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,975	1
0,46	0,64	0,85	1,1	1,38	1,73	2,1	2,52	2,97	3,47	4

Форма собственных колебаний i-го аппарата определяется по коэффициенту частоты

$$\lambda_i = H_i \sqrt{\frac{\mu_i \omega^2}{EJ_{ai}}}, \tag{179}$$

где H_i, μ_i, J_{ai} — соответственно высота, масса и момент инерции поперечного сечения i-го аппарата; $\omega = 2\pi/T$; T — период собственных колебаний, принятый для всего ряда.

При определении периода собственных колебаний отдельно стоящего аппарата или группы аппаратов связь их с соседним оборудованием, осуществляемая при помощи трубопроводов, не учитывается.

5. Период собственных колебаний группы многорядно расположенных аппаратов постоянного сечения, установленных на общем фундаменте и связанных по высоте в двух направлениях горизонтальными площадками, определяется по формуле

$$T = 3{,}63 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} P_i H_i^2}{g k_\varphi}}, \tag{180}$$

где P_i — вес массы i-го аппарата; n — число аппаратов; $k_\varphi = c_\varphi J_\phi$; J_ϕ — момент инерции площади подошвы общего фундамента относительно оси его вращения.

Если аппараты установлены на отдельных фундаментах, то

$$k_\varphi = \frac{c_\varphi}{4} \sum_{i=1}^{n} F_{\phi i}\, a_i^2,$$

где $F_{\phi i}$ — площадь подошвы i-го фундамента; a_i — расстояние между аппаратами, расположенными по i-ой оси.

Форма собственных колебаний для рассматриваемой группы аппаратов принимается как для жесткого тела на упругом основании, т. е. прямая линия.

6. Для аппарата, имеющего переменное сечение по высоте, в качестве первой формы собственных колебаний сооружения может быть принята упругая линия консольного стержня от единичной силы, приложенной к его верху.

Период собственных колебаний такого аппарата определяется по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{r} P_k y_k^2}{g y_0}}, \tag{181}$$

где P_k — вес массы k-го участка аппарата, кН; y_k и y_0 — соответственно ординаты формы собственных колебаний для центра j-го участка и верха аппарата, м/кН; g — ускорение силы тяжести.

В случае упругой заделки аппарата в грунт ординаты формы колебаний

$$y_k = y'_{1k} + \frac{Hz_k}{k_\varphi},$$

где y'_{1k} — ордината, вычисленная в предположении жесткой заделки сооружения в грунт; z_k — расстояние по вертикали от уровня верха фундамента сооружения до центра k-го участка.

Таблица 17

Относительные ординаты формы собственных колебаний $\alpha_1(x)$

λ	x/H										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	0	0,093	0,188	0,285	0,385	0,486	0,588	0,691	0,794	0,89	1
1,1	0	0,089	0,182	0,279	0,378	0,479	0,582	0,686	0,79	0,895	1
1,2	0	0,085	0,175	0,266	0,369	0,471	0,575	0,68	0,787	0,893	1
1,3	0	0,079	0,166	0,259	0,358	0,46	0,566	0,673	0,782	0,891	1
1,4	0	0,073	0,155	0,246	0,344	0,447	0,554	0,665	0,776	0,888	1
1,5	0	0,063	0,145	0,229	0,326	0,43	0,54	0,653	0,768	0,884	1
1,6	0	0,054	0,124	0,209	0,306	0,411	0,523	0,64	0,759	0,879	1
1,7	0	0,042	0,105	0,186	0,281	0,388	0,513	0,624	0,748	0,874	1
1,8	0	0,028	0,082	0,158	0,254	0,362	0,481	0,606	0,736	0,868	1
1,875 (Жесткая заделка)	0	0,017	0,066	0,137	0,239	0,34	0,461	0,587	0,725	0,862	1

Таблица 18

Коэффициенты распределения амплитуд изгибающих моментов $\alpha_2(x)$

λ	x/H										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	0,329	0,28	0,232	0,186	0,143	0,103	0,069	0,04	0,019	0,005	0
1,1	0,479	0,408	0,338	0,271	0,208	0,151	0,101	0,059	0,027	0,007	0
1,2	0,719	0,573	0,476	0,382	0,294	0,213	0,142	0,083	0,038	0,01	0
1,3	0,917	0,783	0,65	0,522	0,402	0,292	0,195	0,114	0,053	0,014	0
1,4	1,218	1,04	0,865	0,696	0,537	0,391	0,261	0,153	0,071	0,018	0
1,5	1,577	1,351	1,126	0,908	0,701	0,511	0,342	0,201	0,093	0,024	0
1,6	2,007	1,719	1,435	1,159	0,897	0,655	0,44	0,259	0,12	0,031	0
1,7	2,499	2,145	1,795	1,402	1,128	0,826	0,586	0,328	0,153	0,04	0
1,8	3,057	2,631	2,207	1,793	1,396	1,025	0,692	0,41	0,191	0,05	0
1,875 (Жесткая заделка)	3,516	3,032	2,551	2,078	1,622	1,194	0,808	0,48	0,225	0,059	0

Таблица 19

Коэффициенты распределения амплитуд поперечных сил $\alpha_3(x)$

λ	x/H										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	0,49	0,486	0,472	0,448	0,415	0,371	0,317	0,254	0,179	0,095	0
1,1	0,711	0,705	0,685	0,651	0,603	0,547	0,463	0,37	0,262	0,139	0
1,2	0,966	0,987	0,96	0,914	0,848	0,761	0,653	0,522	0,37	0,196	0
1,3	1,351	1,34	1,305	1,244	1,156	1,041	0,893	0,716	0,509	0,27	0
1,4	1,781	1,788	1,725	1,649	1,536	1,384	1,192	0,958	0,682	0,363	0
1,5	2,293	2,277	2,226	2,133	1,993	1,802	1,556	1,254	0,895	0,477	0
1,6	2,882	2,865	2,808	2,7	2,532	2,297	1,991	1,611	1,152	0,616	0
1,7	3,544	3,528	3,461	3,348	3,154	2,875	2,503	2,033	1,46	0,783	0
1,8	4,267	4,255	4,199	4,074	3,859	3,537	3,096	2,526	1,822	0,98	0
1,875 (Жесткая заделка)	4,858	4,831	4,786	4,664	4,44	4,089	3,596	2,913	2,133	1,152	0

Примечание. Промежуточные значения $\alpha_1(x)$, $\alpha_2(x)$, $\alpha_3(x)$ определяются линейной интерполяцией.

Для аппарата, установленного на железобетонном постаменте, ордината формы собственных колебаний для центра k-го участка

$$y_k = y_{1k} + y_{2k} + y_{3k} + y_{4k},$$

где y_{1k} — перемещение k-ой точки оси аппарата, вычисленное в предположении жесткой заделки аппарата на уровне верха постамента; y_{2k} — перемещение k-ой точки оси, вызванное поворотом сооружения относительно оси вращения фундаментной плиты постамента

$$y_{2k} = \frac{(H_a + h_п) z_k}{k_\varphi},$$

где H_a и $h_п$ — соответственно высота аппарата и постамента; y_{3k} — перемещение k-ой точки оси сооружения от единичной силы, приложенной к верху постамента

$$y_{3k} = \frac{h_c^3}{12 E_c \Sigma J_c},$$

где ΣJ_c — сумма моментов инерции площадей сечений стоек постамента; h_c — высота стойки, отсчитываемая от верха фундаментной плиты до низа плиты постамента; y_{4k} — перемещение k-ой точки оси сооружения, вызванное обжатием стоек постамента нормальными силами;

$$y_{4k} = \frac{H_a^* h_c \left(z_k - h_п^*\right)}{E_c F_c \sum\limits_{k=1}^{r} y_k^2},$$

где E_c — модуль упругости материала стойки; F_c — площадь ее поперечного сечения; y_k — расстояние от k-ой стойки до оси симметрии постамента; r — число его стоек; H_a^* — высота аппарата до верха стоек постамента; $h_п^*$ — высота постамента от подошвы фундаментной плиты до верха стоек.

Многоэтажные здания. Для симметричных в плане зданий с центром жесткости, совпадающим с центром масс, колебания в трех направлениях (поперечные и продольные поступательные и вращательные) будут независимыми. Формы и частоты колебаний по каждому направлению определяются как для системы с r-степенями свободы методами, приведенными в настоящем приложении, а также в работе [24].

Для несимметричного в плане здания с центром жесткости, не совпадающим с центром масс, уравнения движения имеют вид (рис. 30)

$$\begin{cases} M_j \ddot{x}_j + \sum\limits_{k=1}^{r} (x_k + \rho_y \theta_k) c_{jk}^x = 0 \\ M_j \ddot{y}_j + \sum\limits_{k=1}^{r} (y_k + \rho_x \theta_k) c_{jk}^y = 0 \quad (j = 1, 2, \ldots, k, \ldots, r) \\ J_j \ddot{\theta}_j + \sum\limits_{k=1}^{r} \left(c_{jk}^{\theta} \theta_k + \rho_x c_{jk}^y + \rho_y c_{jk}^x x_k + c_{jk}^{*\theta} \theta_k\right) = 0, \end{cases} \qquad (182)$$

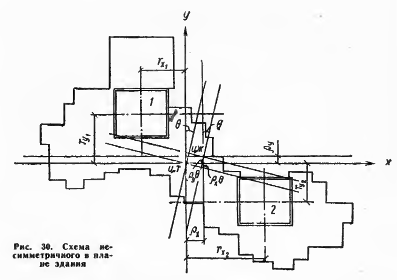


Рис. 30. Схема несимметричного в плане здания

Здесь первые два уравнения характеризуют поступательные, а третье вращательные колебания системы. x_j, y_j и θ_j — соответственно смещения и угол поворота j-го этажа здания; $c^x_{jk}=c^x_{jk1}+$ $+c^x_{jk2}$; $c^y_{jk}=c^y_{jk1}+c^y_{jk2}$; c^θ_{jk} — соответственно коэффициенты жесткости системы при поступательных (c^x_{jk} и c^y_{jk}) и вращательных (c^θ_{jk}) колебаниях; c^x_{jk1}, c^x_{jk2} и c^y_{jk1}, c^y_{jk2} — коэффициенты жесткости ядер в направлениях x и y; $c^\theta_{jk}=c^y_{jk1}\,r^2_{x1}+c^y_{jk2}\,r^2_{x2}+c^x_{jk}\,r^2_{y1}+$ $+c^x_{jk}\,r^2_{y2}$; $c^{*\theta}_{jk}=c^\theta_{jk1}+c^\theta_{jk2}$ — жесткость на кручение ядер здания. Эксцентриситеты

$$\rho_x=\frac{c^y_{jk1}\,r_{x1}-c^y_{jk2}\,r_{x2}}{c^y_{jk}}\,;\quad \rho_y=\frac{c^x_{jk1}\,r_{y1}-c^x_{jk2}\,r_{y2}}{c^x_{jk}}\,,$$

где M_i — масса j-го этажа; J_j — момент инерции масс j-го этажа относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести здания.

Частоты собственных колебаний здания являются корнями частотного уравнения.

Формы собственных колебаний определяются аналогично тому, как это показано выше для систем с конечным числом степеней свободы. Когда центр масс и центр жесткости лежат на одной из главных осей здания, т. е. когда один из эксцентриситетов равен нулю, то одно из уравнений будет независимым от двух других. Так, если $\rho_x=0$; $\rho_y\neq 0$, то здание в направлении y будет совершать незави-

симые поступательные колебания как системы с r степенями свободы.

Собственные частоты и формы колебаний мачты. Задача о собственных колебаниях мачты на вантах, рассматриваемой как линейная пространственная система, может быть решена методом перемещений [39].

Для построения ее основной системы в узлы мачты вводятся дополнительные связи, устраняющие повороты и линейные смещения узлов. Канонические уравнения метода выражают условия равенства нулю реакций во введенных дополнительных связях. Неизвестные в этих уравнениях являются амплитудами динамических перемещений, а коэффициенты при неизвестных — реакциями, вызванными динамическими перемещениями (углами поворота и смещениями) с амплитудой, равной единице.

Реакции определяются из решений дифференциальных уравнений поперечных колебаний *k-го пролета ствола*

$$EJ_k \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + N_k \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + m_k \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0; \quad k = 1,\ 2,\ \ldots,\ r;$$

$$h_{k-1} < z < h_k; \quad h_0 = 0$$

и jk-ой ванты (183)

$$\mu_{jk} \frac{\partial^2 w_{jk}}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x'}\left[T_{0jk}(x') \frac{\partial w_{jk}}{\partial x'}\right] = 0;$$

$$k = 1,\ 2,\ \ldots,\ p; \quad j = 1,\ 2,\ \ldots,\ n,$$

где EJ_k — жесткость ствола на изгиб; N_k — сжимающая сила, действующая на уровне k-го яруса вант; $y(z,\ t)$ — поперечные колебания ствола; $w(x,\ t)$ — поперечные колебания вант; $T_0(x')$ — натяжение в ванте в положении статического равновесия; m_k — масса единицы длины k-го пролета ствола; μ_{jk} — масса единицы длины j-ой ванты k-го яруса; r — число пролетов ствола мачты; m — число ярусов вант; n — число вант в ярусе; h_k — высота k-го узла.

Граничные условия основной системы:

$$y(0,\ t) = w_{jk}(0,\ t) = M(0,\ t) = M(h_r,\ t) = Q(h_r,\ t) = 0;$$

$$y(h_k - 0,\ t) = y(h_k + 0,\ t) = y_k(t); \quad y'(h_k - 0, t) = y'(h_k + 0, t) = \gamma_k(t); \quad w_{jk}(L,\ t) = y_k(t)\sin\theta_{jk},$$

где $y_k(t)$ и $\gamma_k(t)$ — соответственно горизонтальные смещения и угол поворота k-го узла; θ_{jk} — угол, составленный направлением ветра и вантой; L — длина ванты.

Для каждого узла могут быть написаны два уравнения, выражающие условие равенства нулю в узле суммы моментов в заделке и суммы реакции

$$M(h_k - 0, t) - M(h_k + 0,\ t) = 0;$$

$$Q(h_k + 0,\ t) - Q(h_k - 0,\ t) - \sum_{j=1}^{n} T_{jk}(L)\, w_{jk}^{*}(L,\ t)\sin\theta_{jk} + \sum_{j=1}^{n} y_k(t)\,\frac{EF_{jk}}{L_{jk}}\cos^2\theta_{jk} = 0, \qquad (184)$$

Перемещения ствола и ванты можно записать в таком виде:

$$y(z, t) = y(z)\, e^{i\omega t}; \quad w_{jk}(x', t) = w_{jk}(x')\, e^{i\omega t}; \tag{185}$$
$$y_k(t) = y_k\, e^{i\omega t}; \quad \gamma_k(t) = \gamma_k\, e^{i\omega t}.$$

Подставляя (185) в (183), получим уравнение, определяющее форму вынужденных колебаний ванты

$$\frac{d}{dx'}\left[T_{0jk}(x')\frac{dw_{jk}}{dx'}\right] + \mu_{jk}\,\omega^2 w_{jk} = 0; \tag{186}$$
$$w_{jk}(0) = 0; \quad w_{jk}(L) = y_k \sin\theta_{jk}.$$

Примем, что натяжение в положении статического равновесия $T_0(x')$ определяется значением натяжения на верхнем конце и собственным весом ванты

$$T_{0jk}(x') = T_{0jk} - g_{tk}(L - x'),$$

где g_{tk} — составляющая веса единицы длины ванты k-го яруса, направленная вдоль ее хорды; T_{0jk} — статическое натяжение на верхнем конце ванты.

Пусть
$$T_{0jk}(x') = \frac{g_{tk}^2\,\psi^2(x')}{4\mu_{jk}\,\omega^2},$$

тогда вместо уравнения (186) получим

$$\frac{d^2 w_{jk}}{d\psi^2} + \frac{1}{\psi}\frac{dw_{jk}}{d\psi} + w_{jk} = 0; \tag{187}$$

$$w_{jk}[\psi(0)] = 0; \quad w_{jk}[\psi(L)] = y_k \sin\theta_{jk}. \tag{188}$$

Решение уравнения (187), удовлетворяющее граничным условиям (188), выражается через функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка

$$w_{jk}(x') = \frac{y_k \cos\alpha_{jk}\,\{J_0[\psi(0)]\,Y_0[\psi(x')] - Y_0[\psi(0)]\,J_0[\psi(x')]\}}{J_0[\psi(0)]\,Y_0\left[\frac{2}{g_{tk}}\,\nu_{jk}\right] - J_0\left[\frac{2}{g_{tk}}\,\nu_{jk}\right]Y_0[\psi(0)]}, \tag{189}$$

где

$$\nu_{jk} = \omega\sqrt{\mu_{tk}\,T_{0jk}}, \quad \psi(x') = \frac{2\omega}{g_{tk}}\sqrt{\mu_{jk}\,[T_{0jk} - (L_k - x')]}.$$

Если натяжение постоянно по длине ванты, то

$$w_{jk}(x') = \frac{w_{jk}(L_k)}{\sin \nu_{jk} L_k / T_{0jk}} \sin \nu_{jk} x' / T_{0jk}. \tag{190}$$

Реакция подвижного конца ванты при поперечных колебаниях с частотой ω и единичной амплитудой имеет вид

$$r_{jk} = \nu_{jk} \operatorname{ctg} \nu_{jk} L_k / T_{0jk}. \tag{191}$$

Уравнение, определяющее форму собственных колебаний k-го пролета ствола, имеет вид

$$EJ_k \frac{d^4 y_k}{dz^4} + N_k \frac{d^2 y_k}{dz^2} - m_k\,\omega^2 y_k = 0. \tag{192}$$

Уравнение (192) необходимо дополнить граничными условиями трех видов в зависимости от того, какой пролет ствола рассматривается. Так, для опорного пролета при шарнирном опирании ствола имеем

$$y_1(0) = 0;\ \ y_1(l_1) = y_1;\qquad (193)$$

$$y_1''(0) = 0;\ \ y_1'(l_1) = \gamma_1.$$

Для среднего пролета ствола

$$y_k(0) = y_k;\ \ y_k(l_k) = y_{k+1};\qquad (194)$$

$$y_k'(0) = \gamma_k;\ \ y_k'(l_k) = \gamma_{k+1}$$

и для консоли

$$y_r(0) = y_m;\ \ y_r''(l_r) = 0;\qquad (195)$$

$$y_r'(0) = \gamma_m;\ \ EJ_r y_r'''(l_r) + N_r y_r'(l_r) = 0.$$

Здесь $l_k = h_{k+1} - h_k$ — длина k-го пролета ствола.

Общее решение уравнения (192) имеет вид

$$y_k(z) = C_1 \cos\frac{a_k}{l_k}z + C_2 \sin\frac{a_k}{l_k}z + C_3 \operatorname{ch}\frac{d_k}{l_k}z + C_4 \operatorname{sh}\frac{d_k}{l_k}z,\qquad (196)$$

где $c_1 - c_4$ — произвольные постоянные

$$\left.\begin{aligned} a_k &= l_k\sqrt{\frac{N_k}{2EJ_k} + \sqrt{\left(\frac{N_k}{2EJ_k}\right)^2 + \frac{m_k\omega^2}{EJ_k}}};\\ d_k &= l_k\sqrt{-\frac{N_k}{2EJ_k} + \sqrt{\left(\frac{N_k}{2EJ_k}\right)^2 + \frac{w_k\omega^2}{EJ_k}}}. \end{aligned}\right\}\qquad (197)$$

Угол поворота сечения ствола с координатой z:

$$\varphi_k(z) = \frac{a_k}{l_k}\left(-C_1 \sin\frac{a_k}{l_k}z + C_2\cos\frac{a_k}{l_k}z\right) + \\ + \frac{d_k}{l_k}\left(C_3 \operatorname{sh}\frac{d_k}{l_k}z + C_4 \operatorname{ch}\frac{d_k}{l_k}z\right);\qquad (198)$$

изгибающий момент

$$M_k(z) = \frac{EJ_k}{l_k^2}\left[a_k^2\left(C_1\cos\frac{a_k}{l_k}z + C_2\sin\frac{a_k}{l_k}z\right) - \\ - d_k^2\left(C_3\operatorname{ch}\frac{d_k}{l_k}z + C_4\operatorname{sh}\frac{d_k}{l_k}z\right)\right];\qquad (199)$$

поперечная сила

$$Q_k(z) = \frac{EJ_k}{l_k^3}a_k d_k\left[d_k\left(-C_1\sin\frac{a_k}{l_k}z + C_2\cos\frac{a_k}{l_k}z\right) - \\ - a_k\left(C_3\operatorname{sh}\frac{d_k}{l_k}z + C_4\operatorname{ch}\frac{d_k}{l_k}z\right)\right].\qquad (200)$$

Решение уравнения (196) удобно представить в виде

$$y_k(z) = y_{k-1}\, y_{k1}(z) + \gamma_{k-1}\, y_{k2}(z) + y_k\, y_{k3}(z) + \gamma_k\, y_{k4}(z). \quad (201)$$

Тогда изгибающие моменты и поперечные силы в стволе будут описываться выражениями

$$M_k(z) = y_{k-1} M_{k1}(z) + \gamma_{k-1} M_{k2}(z) + y_k M_{k3}(z) + \gamma_k M_{k4}(z); \quad (202)$$

$$Q_k(z) = y_{k-1} Q_{k1}(z) + \gamma_{k-1} Q_{k2}(z) + y_k Q_{k3}(z) + \gamma_k Q_{k4}(z). \quad (203)$$

Функции $y_{ki}(z)$ ($k=1, 2, \ldots, r$, $i=1, 2, 3, 4$) представляют собой частные решения уравнения (192). Отсюда следует, что выражения для этих функций совпадают с (196), а выражения для функций $M_{ki}(z)$ совпадают с (199), а для функций $Q_{ki}(z)$ — с (200).

Обозначим произвольные постоянные, входящие в выражение для $y_{ki}(z)$, через $c_{ki}^{(1)}$—$c_{ki}^{(4)}$. Значения произвольных постоянных определяются из граничных условий (193)—(195). Для того чтобы решение (201) удовлетворяло этим условиям, функция $y_{ki}(z)$ должна удовлетворять условиям следующего вида:

для опорного пролета ствола $y_{11}(z) \equiv 0$; $y_{12}(z) \equiv 0$;

y_{1i}	$y_1(0)$	$y_1'(0)$	$y_1(l_1)$	$y_1'(l_1)$	
$y_{13}(z)$	0	0	1	0	(204)
$y_{14}(z)$	0	0	0	1	

для среднего пролета ствола

y_{ki}	$y_k(0)$	$y_k'(0)$	$y_k(l_k)$	$y_k'(l_k)$	
$y_{k1}(z)$	1	0	0	0	
$y_{k2}(z)$	0	1	0	0	(205)
$y_{k3}(z)$	0	0	1	0	
$y_{k4}(z)$	0	0	0	1	

для консоли $y_{r3}(z)\equiv 0$; $y_{r4}\equiv 0$

$y_{r'i}$	$y_r(0)$	$y'_r(0)$	$y''_r(0)$	$EJ_r y'''(l_r)+N_r y'_r(l_r)$
$y_{r'1}(z)$	1	0	0	0
$y_{r'2}(z)$	0	1	0	0

(206)

Условия (204), (205) и (206) после подстановки в них выражения (196) для функции $y_{ki}(z)$ образуют систему алгебраических уравнений для определения произвольных постоянных. Запишем эти системы в матричной форме:

для опорного пролета ствола

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ a_k^2 & 0 & -d_k^2 & 0 \\ \cos a_k & \sin a_k & \operatorname{ch} d_k & \operatorname{sh} d_k \\ -\frac{a_k}{l_k}\sin a_k & \frac{a_k}{l_k}\cos a_k & \frac{d_k}{l_k}\operatorname{sh} d_k & \frac{d_k}{l_k}\operatorname{ch} d_k \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} C_{13}^{(1)} & C_{14}^{(1)} \\ C_{13}^{(2)} & C_{14}^{(2)} \\ C_{13}^{(3)} & C_{14}^{(3)} \\ C_{13}^{(14)} & C_{14}^{(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (207)$$

для среднего пролета ствола

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{a_k}{l_k} & 0 & \frac{d_k}{l_k} \\ \cos a_k & \sin a_k & \operatorname{ch} d_k & \operatorname{sh} d_k \\ -\frac{a_k}{l_k}\sin a_k & \frac{a_k}{l_k}\cos a_k & \frac{d_k}{l_k}\operatorname{sh} d_k & \frac{d_k}{l_k}\operatorname{ch} d_k \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} C_{k1}^{(1)} & C_{k2}^{(1)} & C_{k3}^{(1)} & C_{k4}^{(1)} \\ C_{k1}^{(2)} & C_{k2}^{(2)} & C_{k3}^{(2)} & C_{k4}^{(2)} \\ C_{k1}^{(3)} & C_{k2}^{(3)} & C_{k3}^{(3)} & C_{k4}^{(3)} \\ C_{k1}^{(4)} & C_{k2}^{(4)} & C_{k3}^{(4)} & C_{k4}^{(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (208)$$

для консоли

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{a_k}{l_k} & 0 & \frac{d_k}{l_k} \\ a_k^2 \cos a_k & a_k^2 \sin a_k & -d_k^2 \operatorname{ch} d_k & -d_k^2 \operatorname{sh} d_k \\ -d_k \sin a_k & d_k \cos a_k & -a_k \operatorname{sh} d_k & -a_k \operatorname{ch} d_k \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} C_{r1}^{(1)} & C_{r2}^{(1)} \\ C_{r1}^{(2)} & C_{r2}^{(2)} \\ C_{r1}^{(3)} & C_{r2}^{(3)} \\ C_{r1}^{(4)} & C_{r2}^{(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (209)$$

Решая системы уравнений (207), (208) и (209) со свободными членами, расположенными в столбцах матриц, в правой части этих систем, получим значения произвольных постоянных, входящих в выражения для изгибающих моментов и поперечных сил в стволе (199), (200). В совокупности с формами вынужденных перемещений вант (192) полученные выражения (199) и (200) представляют собой искомое решение неоднородной краевой задачи о вынужденных колебаниях основной системы с частотой ω под действием амплитудных значений перемещений y_k и γ_k, приложенных в узлах мачты.

Подставляя (189) и (202), (203) в уравнения равновесия (184), получим каноническую систему уравнений метода перемещений в виде

$$A_1(\omega)\vec{\gamma} + A_2(\omega)\vec{y} = 0; \qquad (210)$$
$$A_3(\omega)\vec{\gamma} + [A_4(\omega) + H(\omega)]\vec{y} = 0,$$

где $\vec{\gamma}$—p—мерный вектор углов поворота ствола в узлах мачты; $\vec{y}$—p—мерный вектор горизонтальных перемещений узлов; $H(\omega)$ — диагональная матрица порядка p, на главной диагонали которой расположены значения $H_k(\omega)$ реакций вант на горизонтальное перемещение узла с частотой ω и единичной амплитудой; $A_1(\omega)$ — матрица, образованная элементами табл. 20, расположенными в ее верхней левой четверти; $A_2(\omega)$ — то же, с элементами в правой верхней четверти; $A_3(\omega)$ — то же, с элементами в левой нижней четверти; $A_4(\omega)$ — то же, с элементами в правой нижней четверти;

$$H_k(\omega) = \sum_{j=1}^{n} \left[\frac{EF_{jk}}{L_{jk}} \cos^2\theta_{jk} - \nu_{jk} \sin^2\theta_{jk} \times \right.$$
$$\left. \times \frac{J_0[\psi(0)]Y_0(\nu_{jk}) - Y_0[\psi(0)]J_0(\nu_{jk})}{J_0[\psi(0)]Y_0[\psi(L)] - J_0[\psi(0)]Y_0[\psi(0)]} \right]. \qquad (211)$$

Таблица 20

Номер узла	$A_1(\omega)$			$A_2(\omega)$		
	γ_1	γ_2	γ_3	y_1	y_2	y_3
1	$M_{22}(0)-M_{12}(l_1)$	$M_{24}(0)$	0	$M_{21}(0)-M_{11}(l_1)$	$M_{23}(0)$	0
2	$-M_{22}(l_2)$	$M_{32}(0)-M_{22}(l_2)$	$M_{33}(0)$	$-M_{21}(l_2)$	$M_{31}(0)-M_{23}(l_2)$	$M_{34}(0)$
3	0	$-M_{32}(l_3)$	$M_{42}(0)-M_{34}(l_3)$	0	$-M_{31}(l_3)$	$M_{41}(0)-M_{33}(l_3)$
1	$Q_{22}(0)-Q_{12}(l_1)$	$Q_{24}(0)$	0	$Q_{21}(0)-Q_{11}(l_1)$	$Q_{23}(0)$	0
2	$-Q_{22}(l_2)$	$Q_{32}(0)-Q_{22}(l_2)$	$Q_{33}(0)$	$-Q_{21}(l_2)$	$Q_{31}(0)-Q_{23}(l_2)$	$Q_{34}(0)$
3	0	$-Q_{32}(l_3)$	$Q_{42}(0)-Q_{34}(l_3)$	0	$-Q_{31}(l_3)$	$Q_{41}(0)-Q_{33}(l_3)$
	$A_3(\omega)$			$A_4(\omega)$		

Матрица в табл. 20 симметрична в силу закона взаимности реакций, поэтому $A_2(\omega) = A_3(\omega)$. Таблица построена для трехъярусной мачты. Таким же образом составляется соответствующая таблица для мачты с любым числом ярусов.

Система алгебраических линейных уравнений (210) определяет амплитудные значения перемещений y_k и γ_k в узлах мачты при свободных колебаниях с частотой ω. Эта система однородна и поэтому имеет ненулевые решения при условии равенства ее определителя нулю. Таким образом, для определения собственных частот рассматриваемой линейной системы получаем частотное уравнение

$$\begin{vmatrix} A_1(\omega) & A_2(\omega) \\ A_3(\omega) & A_4(\omega) + H(\omega) \end{vmatrix} = 0. \qquad (212)$$

Корни уравнения (212) представляют собой собственные частоты рассматриваемой линейной системы.

Подставляя найденные значения собственных частот в систему уравнений (210), можно с точностью до произвольного постоянного определить численные значения перемещений узлов y_k и γ_k, соответствующих собственным формам рассматриваемой линейной системы. Наконец, подставляя эти значения в выражения (201), (202), (203) и (189), получим собственные формы, точнее, коэффициенты распределения амплитуд перемещений ствола и вант, а также амплитуд изгибающих моментов и поперечных сил в стволе, соответствующих этим формам. Введем обозначения для этих коэффициентов. Пусть $\alpha_{ki}(z)$ — коэффициент распределения амплитуд перемещений k-го яруса ствола, соответствующий i-ой собственной форме; $\beta_{jki}(x')$ — то же, перемещений j-ой ванты k-го яруса; $\alpha_{ki}^{M}(z)$ — то же, изгибающих моментов в k-м пролете ствола; $\alpha_{ki}^{Q}(z)$ — то же, поперечных сил в k-ом пролете ствола.

Полученные коэффициенты распределения можно пронормировать, умножив на коэффициент $1/\sqrt{M_i}$,

где обобщенная масса

$$M_i = \sum_{k=1}^{r} \int_0^{l_k} m_k \alpha_{ki}^2(z)\, dz + \sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \int_0^{L_{jk}} \mu_{jk} \beta_{jki}^2(x')\, dx. \qquad (213)$$

Изложенный алгоритм вычисления собственных частот и форм модели позволяет получать собственные частоты и формы более простых линейных моделей мачты.

Так, если в выражении (211) ограничиться первым слагаемым для реакции яруса вант

$$H_k(\omega) = \sum_{j=1}^{n} \frac{EF_{jk}}{L_{jk}} \cos^2\theta_{jk},$$

то получим собственные частоты и формы стержня на линейно-податливых опорах.

Примеры расчета

ПРИМЕР 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА БАШНЮ

Схема башни и ее геометрические характеристики приведены на рис. 1.

Участки	Сечение участков	Площадь сечения ветвей м²	Момент инерции сечений участков м⁴	$\frac{J_c}{J}$
0–I	Ф168/20; 0,875	0,037	0,029	1
I–II	Ф168/20; 0,875	0,037	0,029	1
II–III	Ф168/20; 1,093	0,037	0,045	0,645
III–IV	Ф245/20; 1,63	0,057	0,15	0,193
IV–V	Ф275/20; 2,3	0,07	0,4	0,072
V–VI	Ф325/24; 3	0,091	0,83	0,035
VI–VII	Ф325/31; 3,615	0,125	1,8	0,016
VII–VIII	Ф425/14; 5,5	0,16	4,9	0,006
VIII–IX	Ф425/14; 7,6	0,166	9,5	0,003
IX–X	Ф425/14; 9,414	0,166	17,33	0,002

Рис. 1. *а* — конструктивная схема башни; *б* — расчетная схема

1. Определение периода собственных колебаний башни

Период основного тона собственных колебаний башни определяем энергетическим методом

$$T=2\pi\sqrt{\frac{\sum\limits_{k=0}^{r}P_k y_k^2}{g y_0}}=6,28\sqrt{\frac{528\cdot 33\cdot 10^{-3}}{9,81\cdot 6,2\cdot 10^{-2}}}=1,84\ \text{с},$$

где P_k — сила веса массы k-го участка башни, кН; y_k — перемещения точек оси башни при действии силы $P=1$ кН на верхний конец сооружения

Рис. 2. Перемещения точек оси башни при действии силы $P=1$ кН

№ п. п.	y_k, м	$P_k\,y_k^2$, кН·м²
y_0	$6,2\cdot 10^{-2}$	
y_1	$5,1\cdot 10^{-2}$	$274\cdot 10^{-3}$
y_2	$3,43\cdot 10^{-2}$	$123\cdot 10^{-3}$
y_3	$2,37\cdot 10^{-2}$	$59\cdot 10^{-3}$
y_4	$1,51\cdot 10^{-2}$	$41\cdot 10^{-3}$
y_5	$0,89\cdot 10^{-2}$	$19,6\cdot 10^{-3}$
y_6	$0,505\cdot 10^{-2}$	$8,2\cdot 10^{-3}$
y_7	$0,256\cdot 10^{-2}$	$2,63\cdot 10^{-3}$
y_8	$0,98\cdot 10^{-2}$	$0,8\cdot 10^{-3}$
y_9	$0,033\cdot 10^{-2}$	$0,1\cdot 10^{-3}$
y_{10}	$0,001\cdot 10^{-2}$	$0,00015\cdot 10^{-3}$
	$\Sigma P_k y_k^2$	$528,33\cdot 10^{-3}$

2. Определение коэффициента лобового сопротивления для участка башни

Коэффициент $c_ф$ для наветренной плоскости участка 6—7 башни определяется по п. 23, табл. 1, прил. 1.

$$c_ф = \frac{\Sigma c_i f_i}{S} = \frac{2 \cdot 0,325 \cdot 22,5 \cdot 0,46 + 2 \cdot 0,028 \cdot 27,6 \cdot 1,2 +}{186} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ 0,168 \cdot 17,78 \cdot 0,46 + 0,114 \cdot 15,28 \cdot 0,75}{186} = 0,06;$$

$$\varphi = \frac{\Sigma f_i}{S} =$$

$$= \frac{2 \cdot 0,325 \cdot 22,5 + 2 \cdot 0,028 \cdot 27,6 + 0,168 \cdot 17,78 + 0,114 \cdot 15,28}{186} = 0,11;$$

$$S = \frac{6,7 + 2 \cdot 0,325 + 9,2}{2} \cdot 22,5 = 186 \text{ м}^2.$$

Здесь c_i — коэффициент лобового сопротивления элементов башни; для цилиндрических элементов c_i определяется по графику п. 13, табл. 1, прил. 1.

Для рассматриваемого участка башни

$$v = 1,28 \sqrt{n_п q_0 k(z)} = 1,28 \sqrt{1,3 \cdot 350 \cdot 1,92} = 36 \text{ м/с}.$$

Диаметр элемента	— 325 мм;	$Re = 8,4 \cdot 10^5$;	$c_x = 0,46$;
»	— 114 мм;	$Re = 3 \cdot 10^5$;	$c_x = 0,75$;
»	— 168 мм;	$Re = 4,35 \cdot 10^5$;	$c_x = 0,45$;
»	— 28 мм;	$Re = 0,72 \cdot 10^5$;	$c_x = 1,2$.

Коэффициент лобового сопротивления для башни

$$c_{пр} = c_ф (1 + \eta) \psi = 0,06 (1 + 0,99) 1,1,$$

Для $\varphi = 0,11$, $\eta = 0,99$ (п. 24, табл. 1, прил. 1); ψ — коэффициент увеличения $c_{пр}$ при направлении ветра по диагонали башни, принимаемый по п. 25, табл. 1.

3. Определение ветровой нагрузки на башню

Нормативный скоростной напор для II района $q_0 = 350$ Па. Принимаемая в расчете скорость ветра

$$v = 1,28 \sqrt{q_0 n_п} = 1,28 \sqrt{350 \cdot 1,3} = 27 \text{ м/с}.$$

Параметр

$$\varepsilon_1 = \frac{1,84 \cdot 27}{1200} = 0,04.$$

Найденному значению ε_1 соответствует $\xi_1 = 1,85$. Коэффициент пространственной корреляции $\nu = 0,53$.

Определение расчетной ветровой нагрузки приведено в табл. I.

Номера участков сооружения	Высота участка h_k, м	Площадь наветренной грани S, м²	Масса участка M_k, т	Коэффициенты: возрастания скоростного напора по высоте, $k(z_k)$	лобового сопротивления $c_{k\,пр}$	пульсации скоростного напора m_k	Статическая составляющая ветровой нагрузки $Q^{c}_{Hk} = q_0 S c_{k\,пр} k(z_k)$, кН
0—1	15	28,77	10,7	2,39	0,284	0,391	6,835
1—2	10	19,18	10,7	2,34	0,284	0,396	4,461
2—3	12	28,25	10,7	2,296	0,227	0,4	5,153
3—4	17	59,58	18,35	2,238	0,193	0,403	9,006
4—5	18	87,71	25,28	2,168	0,173	0,413	11,515
5—6	18	113,85	32,62	2,091	0,162	0,419	13,496
6—7	22,5	186,19	40,77	1,916	0,131	0,441	16,356
7—8	27	308,52	84,61	1,69	0,131	0,466	23,907
8—9	27	421,9	94,8	1,355	0,099	0,525	19,802
9—10	13,5	259,93	100,92	1	0,131	0,6	11,918

Номера расчетных сечений	Статический расчет (расчетная									
	Отметки расчетных сечений	Расчетный изгибающий момент	Вертикальная нагрузка	Толщина железобетонной стенки	Средний радиус сечения $\frac{r_н + r_{вн}}{2}$	$\frac{N}{20rh}$	$\frac{M_в k}{Nr}$	Арматура: наружная	внутренняя	$F_{a\,нар} + F_{a\,вн}$
		$M_в$, кН·м	N, кН	h, м	r, м	$n_б$, мПа	c_0	$F_{a\,нар}$, см²	$F_{a\,вн}$, см²	F_a, см²
1	370	37 800	10 900	0,25	5,12	4,26	0,677	—	—	31,42
2	325	151 680	23 000	0,25	6,47	7,11	1,019	—	—	38,01
3	280	345 080	38 450	0,3	7,8	8,22	1,151	—	—	57,34
4	235	624 820	61 180	0,4	9,1	8,4	1,122	—	—	72
5	190	996 520	93 370	0,48	10,41	9,34	1,025	—	—	72
6	145	1 463 760	137 510	0,56	12,62	9,72	0,843	—	—	72
7	100	2 030 230	197 500	0,64	14,83	10,4	0,693	—	—	80,43
6	55	2 696 020	277 010	0,72	17,49	11	0,556	—	—	80,43
9	0	3 476 680	412 810	0,90	20,7	11,08	0,407	—	—	80,43

Примечание. Для величины μ_1: b — ширина полосы =

Таблица 1

Относительные ординаты формы собственных колебаний сооружения α_{jk}	Обобщенная сила, $\sum_{k=1}^{r} m_k \alpha_{1k} Q^{c}_{нk}$	Обобщенная масса $\sum_{k=1}^{r} M_k \alpha^2_{1k}$	$A = \frac{\sum_{k=1}^{r} Q^{c}_{нk} \alpha_{1k} m_k}{\sum_{k=1}^{r} M_k \alpha^2_{1k}}$	Приведенное ускорение $\eta_{1j} = \alpha_{1j} A$	Ветровая нагрузка: динамическая составляющая $Q^{д}_{нj} = M_j \eta_{1j} \xi_1 \nu$, кН	Ветровая нагрузка: расчетная $Q_j = \left(Q_{нj} + Q^{д}_{н1j} \right) n_{п}$, кН
0,822	2,194	7,23		0,383	4,018	14,05
0,553	0,977	3,272		0,248	2,707	9,27
0,382	0,788	1,561		0,178	1,867	9,11
0,243	0,882	1,084		0,113	2,033	14,351
0,143	0,681	0,517		0,067	1,661	17,11
0,0814	0,46	0,216	0,466	0,038	1,215	19,1
0,0412	0,298	0,069		0,019	0,759	22,3
0,0158	0,176	0,0021		0,0074	0,614	31,94
0,0053	0,055	0,003		0,0025	0,232	26,04
0,0002	0,0014	0		0,0001	0.01	15,34
	Σ=6,512	Σ=13,973				

Таблица 2

ветровая нагрузка, 1-е приближение)

$\frac{F_a}{bh}$	$\frac{E_a}{E_б}$	$4\mu_1 n$	Определение напряжений в бетоне и арматуре от внешних расчетных нагрузок: центральный угол, ограничивающий сжатую зону	$\frac{\beta}{\sin\beta}$	$\frac{\pi-\beta}{\sin\beta}$	$\frac{\sin\beta}{\pi-\beta}$	$\frac{n_б\left(c_0 \frac{\beta}{\sin\beta} - 1\right)}{\pi\mu_1}$ или $\frac{A_a n_б}{\mu}$ (для ослабленного сечения)	$\frac{n_б\left(c_0 \frac{\pi-\beta}{\sin\beta} + 1\right)}{\pi(1+\alpha_1)}$ или $A_c n_б$ (для ослабленного сечения)
μ_1	n	α_1	β	принимается по графику рис. 32 [25]			$\sigma_{ан} \leq \gamma_a R_a$, МПа	$\sigma_{бн}$, МПа
0,013	6,35	0,330	105	1,898	1,355	0,738	29,76	1,96
0,015	6,35	0,381	93	1,625	1,521	0,657	99,03	4,18
0,019	6,35	0,483	92	1,607	1,537	0,651	117,04	4,89
0,018	6,35	0,457	92	1,607	1,537	0,651	119,38	5
0,015	6,35	0,381	93	1,625	1,521	0,657	132,07	5,51
0,013	6,35	0,330	97	1,706	1,460	0,685	104,35	5,19
0,013	6,35	0,330	104	1,870	1,368	0,731	75,45	4,85
0,011	6,35	0,279	112	2,109	1,280	0,781	55,16	4.69
0,009	6,35	0,229	126	2,718	1,166	0,858	73,86	6,43

100 см, h, см; A_a и A_c принимаются по графикам рис. 40—45 [25].

Таблица 2а

Определение кривизны и отклонений оси ствола от внешних расчетных нагрузок. (1-е приближение)

Номера расчетных сечений	$\frac{\sigma_{ан}+\frac{\alpha_1}{\mu_1}\sigma_{бн}}{0,6E_a r\left(1+\frac{\sin\beta}{\pi-\beta}\right)}$, $1/\rho$	Эпюра кривизны	Площадь участка эпюры	Ордината центра тяжести фигуры $h_a=\frac{h}{3}\cdot\frac{a+2b}{a+b}$, [M]	Отклонение оси ствола: $Y_н$, м	Отклонение оси ствола: от крена фундамента $Y_ф$, м	Отклонение оси ствола: суммарное ΣY, м
1	$74,34\cdot10^{-6}$		$1672\cdot10^{-6}$	30	7,633 5,84	0,623 0,547	8,256 6,387
2	$159,47\cdot10^{-6}$		$5260\cdot10^{-6}$	23,24	4,211	0,473	4,684
3	$156,11\cdot10^{-6}$		$7101\cdot10^{-6}$	22,58	2,863	0,405	3,268
4	$136,64\cdot10^{-6}$		$6586\cdot10^{-6}$	19,77	1,843	0,338	2,181
5	$131,40\cdot10^{-6}$		$6030\cdot10^{-6}$	22,65	1,079	0,270	1,349
6	$92,53\cdot10^{-6}$		$5038\cdot10^{-6}$	23,8	0,574	0,203	0,777
7	$64,45\cdot10^{-6}$		$3532\cdot10^{-6}$	23,84	0,256	0,135	0,391
8	$46,56\cdot10^{-6}$		$2500\cdot10^{-6}$	22,71	0,753	0,067	0,142
9	$51,43\cdot10^{-6}$		$2695\cdot10^{-6}$	27,95	0	0	0

Таблица 3

Номера расчетных сечений	Статический расчет (расчетная ветровая нагрузка, 2-е приближение)									
	Отметки расчетных сечений	Расчетный изгибающий момент	Вертикальная нагрузка	Толщина железобетонной стенки	Средний радиус сечения $\frac{r_н + r_{вн}}{2}$	$\frac{N}{20rh}$	$\frac{M_в k}{Nr}$ $(k=1,0)$	Арматура		
								наружная	внутренняя	$F_{a\,нар} + F_{a\,вн}$
		$M_в$, кН·м	N, кН	h, м	r, м	$n_б$, МПа	c_0	$F_{a\,нар}$, см²	$F_{a\,вн}$, см²	F_a, см²
1	370	47 990	10 900	0,25	5,12	4,26	0,860	—	—	31,42
2	325	190 740	23 000	0,25	6,47	7,11	1,282	—	—	38,01
3	280	427 650	38 450	0,30	7,8	8,22	1,426	—	—	57,34
4	235	761 560	61 180	0,40	9,1	8,40	1,368	—	—	72,0
5	190	1 197 550	93 370	0,48	10,41	9,34	1,232	—	—	72,0
6	145	1 730 800	137 510	0,56	12,62	9,72	0,997	—	—	72,0
7	100	2 361 940	197 500	0,64	14,83	10,40	0,806	—	—	80,43
8	55	3 086 610	277 010	0,72	17,49	11,00	0,637	—	—	80,43
9	8	3 916 250	412 810	0,90	20,70	11,08	0,458	—	—	80,43

Продолжение

Номера расчетных сечений	Статический расчет (расчетная ветровая нагрузка, 2-е приближение)								
				Определение напряжений в бетоне и арматуре от внешних расчетных нагрузок					
	$\frac{E_a}{bh}$	$\frac{E_a}{E_б}$	$4\mu_1 n$	центральный угол, ограничивающий сжатую зону	$\frac{\beta}{\sin\beta}$	$\frac{\pi-\beta}{\sin\beta}$	$\frac{\sin\beta}{\pi-\beta}$	$\frac{n_б\left(c_0\frac{\beta}{\sin\beta}-1\right)}{\pi\mu_1}$ или $\frac{A_a^* n_б}{\mu}$ (для ослабленного сечения)	$\frac{n_б\left(c_0\frac{\pi-\beta}{\sin\beta}+1\right)}{\pi(1+\alpha_1)}$ или $A_a^* n_б$ (для ослабленного сечения)
	μ_1	n	α_1	β	принимаются по графику рис. 32 [25]			$\sigma_{ан} \leq \gamma_a R_a$, МПа	$\sigma_{бн}$, МПа
1	0,013	6,35	0,330	97	1,706	1,459	0,685	48,76	2,52
2	0,015	6,35	0,381	87	1,521	1,625	0,615	143,41	5,05
3	0,019	6,35	0,483	88	1,537	1,607	0,622	164,12	5,81
4	0,018	6,35	0,457	88	1,537	1,607	0,622	163,99	5,87
5	0,015	6,35	0,381	88	1,537	1,607	0,622	177,28	6,41
6	0,013	6,35	0,330	92	1,607	1,537	0,651	143,42	5,81
7	0,013	6,35	0,330	99	1,750	1,431	0,699	104,51	5,36
8	0,011	6,35	0,279	106	1,925	1,344	0,744	79,06	5,08
9	0,009	6,35	0,229	120	2,417	1,210	0,827	86,16	6,65

Примечание. Для величины μ_1: b — ширина полосы = 100 см; h, см; A_a и A_0 принимаются по графикам 40—45 [25].

Таблица 3а

Номера расчетных сечений	$\dfrac{\sigma_{ан}+\dfrac{\alpha_1}{\mu_1}\sigma_{бп}}{0{,}6\,E_а\,r\left(1+\dfrac{\sin\beta}{\pi-\beta}\right)}$ $1/\rho$	Эпюра кривизны	Площадь участка эпюры	ордината центра тяжести фигуры $h_a=\frac{h}{3}\cdot\frac{a+2b}{a+b}$, м	Отклонение оси ствола: $Y_н$, м	Отклонение оси ствола: от крена фундамента $Y_ф$, м	Отклонение оси ствола: суммарное ΣY, м
					9,423	0,623	10,046
1	$108{,}77\cdot10^{-6}$		$2447\cdot10^{-6}$	30	7,121	0,547	7,668
2	$216{,}70\cdot10^{-6}$		$7323\cdot10^{-6}$	24,99	5,04	0,473	5,513
3	$205{,}35\cdot10^{-6}$		$9496\cdot10^{-6}$	22,3	3,353	0,405	3,760
4	$176{,}71\cdot10^{-6}$		$8597\cdot10^{-6}$	21,94	2,08	0,338	2,418
5	$167{,}90\cdot10^{-6}$		$7754\cdot10^{-6}$	22,3	1,171	0,27	1,441
6	$117{,}16\cdot10^{-6}$		$6414\cdot10^{-6}$	21,16	0,587	0,203	0,79
7	$79{,}56\cdot10^{-6}$		$4426\cdot10^{-6}$	21,06	0,246	0,135	0,381
8	$54{,}89\cdot10^{-6}$		$3025\cdot10^{-6}$	21,12	0,069	0,067	0,136
9	$56{,}25\cdot10^{-6}$		$2501\cdot10^{-6}$	27,61	0	0	0

Таблица: Определение кривизны отклонений оси ствола от внешних расчетных нагрузок (2-е приближение)

Номера участков	Высота участка, м	Масса на единицу высоты участков трубы, μ т/м	Масса участков трубы M_K, т	Прогибы трубы от расчетной статической составляющей ветровой нагрузки, м	Относительные прогибы трубы, $y_{отн}$	
					границ участков	центров участков
0—1	45	24,7	1 112	9,423	1	0,878
1—2	45	27,4	1 233	7,121	0,756	0,6455
2—3	45	35	1 575	5,04	0,535	0,4455
3—4	45	51,5	2 318	3,355	0,356	0,2885
4—5	45	72,9	3 281	2,08	0,221	0,1725
5—6	45	100	4 500	1,171	0,124	0,093
6—7	45	135,9	6 116	0,587	0,062	0,044
7—8	45	180,1	8 105	0,246	0,026	0,0165
8—9	55	251,7	11 327	0,069	0,007	0,0035

Прогиб верхушки трубы $y_в = \frac{82,2 \cdot 10^7 \omega^2}{22 \cdot 10^7} = 3,74\ \omega^2$.

Приравнивая ординаты кривых первого и второго приближения для верхушки трубы, получим первое приближенное значение периода собственных колебаний, $1 = 3,74\ \omega^2$; $\omega = 0,517$ р/с; $T = 2\pi/\omega = 12,15$ с.

Таблица 4

Инерционные силы, $M_к y_{отн} \omega^2$	Жесткость сечений трубы $B_к$ кНм²	$\frac{B_c}{B_к}$	$M_{из} \frac{B_c}{B_к}$	Относительные прогибы трубы 2-го приближения
$976 \omega^2$	$22 \cdot 10^7$	1	$22\,140 \omega^2$	1
$796 \omega^2$	$66 \cdot 10^7$	0,333	$7\,373 \omega^2$ $28\,232 \omega^2$	0,74
$702 \omega^2$	$148 \cdot 10^7$	0,149	$12\,632 \omega^2$ $27\,125 \omega^2$	0,515
$669 \omega^2$	$320 \cdot 10^7$	0,069	$12\,561 \omega^2$ $21\,485 \omega^2$	0,339
$566 \omega^2$	$572 \cdot 10^7$	0,038	$11\,832 \omega^2$ $17\,886 \omega^2$	0,208
$418 \omega^2$	$1095 \cdot 10^7$	0,02	$9\,414 \omega^2$ $13\,102 \omega^2$	0,118
$269 \omega^2$	$2223 \cdot 10^7$	0,01	$6\,551 \omega^2$ $8\,580 \omega^2$	0,06
$134 \omega^2$	$4296 \cdot 10^7$	0,005	$4\,290 \omega^2$ $5\,362 \omega^2$	0,026
$40 \omega^2$	$6293 \cdot 10^7$	0,0035	$3\,754 \omega^2$ $4\,557 \omega^2$	0,0074

ПРИМЕР 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННУЮ ДЫМОВУЮ ТРУБУ

Схема дымовой трубы и ее геометрические характеристики приведены на рис. 3.

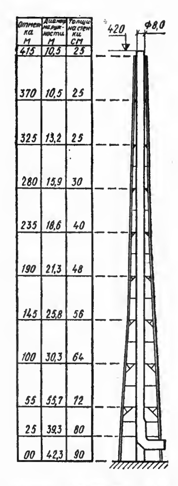


Рис. 3. Дымовая железобетонная труба H=420 м

1. Определение первой собственной частоты и формы колебаний трубы

В качестве расчетной схемы трубы принят защемленный в основание консольный стержень с девятью сосредоточенными по высоте массами. Согласно п. 6.6, для определения ветровой нагрузки на трубу учитываются только ее первые собственная частота и собственная форма колебаний, определяемые методом последовательных приближений. Эпюры кривизн и линия прогибов оси трубы при действии расчетной ветровой нагрузки построены на основании данных статического расчета трубы второго приближения. Статический расчет дымовой трубы на ветровую нагрузку в первом и втором приближении, выполненный в соответствии с указаниями п. 6.11., эпюры кривизн и линии прогибов оси трубы приведены в табл. 2 и 3.

Вычисление основного периода и первой формы собственных колебаний трубы дано в табл. 4 и на рис. 4.

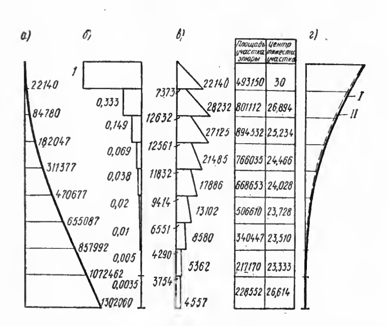


Рис. 4

а — эпюра изгибающих моментов от сил инерции; *б* — B_c/B_k; *в* — приведенная эпюра изгибающих моментов; *г* — собственные формы трубы I и II приближений

2. Определение ветровой нагрузки на трубу

Нормативный скоростной напор $q_0 = 700$ Па. Принимаемая в расчет скорость ветра

$$v = 1,28 \sqrt{1,5 \cdot 700} = 41 \text{ м/с}.$$

Параметр

$$\varepsilon_1 = \frac{T_1 v}{1200} = \frac{12,15 \cdot 41}{1200} = 0,415.$$

Коэффициент динамичности $\varepsilon = 2,29$ принимается по табл. 6, п. 6.3. Коэффициент пространственной корреляции $\nu = 0,5$.

Определение расчетной ветровой нагрузки на трубу приведено в табл. 6.

Расчетные изгибающие моменты в сечениях трубы даны в табл. 5.

Таблица 5

Номера участков	1	2	3	4
M_p, кН·м	$0,398 \cdot 10^5$	$1,59 \cdot 10^5$	$3,61 \cdot 10^5$	$6,52 \cdot 10^5$

Продолжение

Номера участков	5	6	7	8	9
M_p, кН·м	$10,36 \cdot 10^5$	$15,18 \cdot 10^5$	$21 \cdot 10^5$	$27,83 \cdot 10^5$	$35,93 \cdot 10^5$

Таблица 6

Номера участков сооружения	Высота участка h_k, м	Диаметр участка d, м	Масса участка M_k, т	Коэффициенты: лобового сопротивления c_{xk}	Коэффициенты: возрастания скоростного напора по высоте $k(z_k)$	Коэффициенты: пульсации скоростного напора m_k	Статическая составляющая ветровой нагрузки $Q^c_{нk} = q_0 h_k c_{xk} k(z_k) d$, кН
0—1	45	10,5	1 112	0,7	3,1	0,35	718
1—2	45	11,85	1 233	0,7	3,09	0,35	807
2—3	45	14,55	1 575	0,7	2,95	0,359	946
3—4	45	17,25	2 318	0,7	2,81	0,368	1069
4—5	45	19,95	3 281	0,7	2,65	0,377	1167
5—6	45	23,55	4 500	0,7	2,46	0,393	1277
6—7	45	28,05	6 116	0,7	2,24	0,41	1385
7—8	45	33,0	8 105	0,7	1,91	0,442	1390
8—9	55	39,0	11 327	0,7	1,37	0,524	1440

Продолжение табл. 6

Номера участков сооружения	Относительные ординаты формы собственных колебаний сооружения α_{1k}	Обобщенная сила $\sum_{k=1}^{r} m_k \alpha_{1k} Q^c_{нk}$	Обобщенная масса $\sum_{k=1}^{r} M_k \alpha^2_{1k}$	$A = \frac{\sum_{k=1}^{r} Q^c_{нk} \alpha_{1k} m_k}{\sum_{k=1}^{r} M_k \alpha^2_{1k}}$	Приведенное ускорение $\eta_{1j} = \alpha_{1j} A$	Ветровая нагрузка: динамическая составляющая $Q^д_{нj} = M_k \eta_{1j} \xi_1 \nu_1$, кН	Ветровая нагрузка: расчетная $Q_j = \left(Q^c_{нj} + Q^д_{нj} \right) n_п$, кН
0—1	0,87	218,6	841,7	0,4164	0,362	461	1768
1—2	0,63	177,9	489,4		0,262	370	1765
2—3	0,43	146	291,2		0,179	323	1903
3—4	0,27	106,2	169		0,112	297	2049
4—5	0,16	70,4	84		0,0666	250	2125
5—6	0,089	44,7	35,6		0,0371	191	2202
6—7	0,043	24,4	11,3		0,0179	125	2265
7—8	0,017	10,4	2,3		0,0071	66	2184
8—9	0,0038	2,9	0,2		0,0016	21	2191
		$\Sigma = 801,5$	$\Sigma = 1924,7$				

3. Вихревое возбуждение дымовой трубы

В соответствии с указаниями п. 7.3 для дымовой трубы, имеющей форму усеченного конуса, критическая скорость ветра определяется по формуле

$$v_{кр}=5\frac{d}{T_1}=\frac{5\cdot 16}{12,15}=6,7 \text{ м/с},$$

где d — диаметр сечения трубы на уровне 2/3 ее высоты.

Так как критическая скорость ветра меньше $0,64\sqrt{q_0}=0,64\sqrt{700}=16,8$ м/с, то поверочный расчет на резонанс не производится.

Определим усилия в верхней части трубы при вихревом возбуждении, соответствующие второй форме собственных колебаний сооружения.

Критическая скорость ветра вычисляется по формуле

$$v_{кр}=\frac{d}{T_2\,\text{Sh}}=30,8 \text{ м/с},$$

где $d=28{,}05$ м — диаметр трубы, для которого величина $\alpha_2(z_k)d^4$ максимальна; $\alpha_2(z_k)$ — 2-я собственная форма колебаний (рис. 5); $T_2=4{,}13$ с; Sh$=0{,}22$ — число Струхаля.

Расчетное значение обобщенной координаты определяется по формуле

$$p_p=\sqrt{\frac{2\pi L}{\gamma\beta}\left[\frac{C_L\,\rho d^4\,\alpha_2(z_{кр})}{8\pi^2\,\text{Sh}^2 M_2}\right]}=$$

$$=\sqrt{\frac{2\cdot 3,14\cdot 2}{0,1\cdot 0,087}\left(\frac{0,25\cdot 1,29\cdot 10^{-3}\cdot 28^4\cdot 0,132}{8\cdot 3,14^2\cdot 0,22^2\cdot 1710}\right)}=0,152 \text{ м}.$$

Здесь $L=2$ (в диаметрах трубы); $\gamma=0,1$;

$$\beta=\alpha_A\frac{d_{кр}}{z_{кр}}+t=0,16\,\frac{28}{122}+0,05=0,087;$$

$$c_y=0,25;\ \rho=1,29\cdot 10^{-3}\ \text{т/м}^3;\ \ \alpha_2(z_{кр})=0,132;$$

$$M_2=\Sigma M(z_k)\,\alpha^2(z_k)=1710 \text{ т}.$$

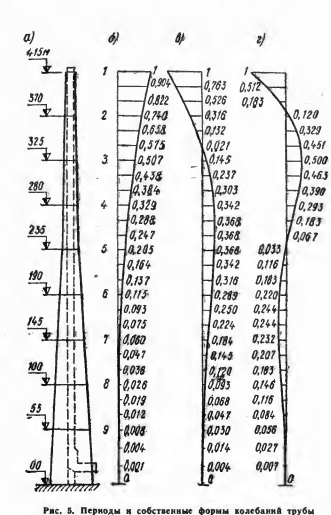


Рис. 5. Периоды и собственные формы колебаний трубы

а — схема трубы; *б* — 1-я форма; *в* — 2-я форма; *г* — 3-я форма

Изгибающие моменты в сечениях трубы, возникающие при вихревом возбуждении, приведены в табл. 7.

Расчетные изгибающие моменты при вихревом возбуждении определяются по формуле

$$M_{\text{р}} = \sqrt{[M^{\text{рез}}]^2 + [M^{\text{с}}_{\text{укр}} + M^{\text{д}}_{\text{укр}}]^2},$$

Таблица 7

Номера участков	1	2	3	4
$M^{рез}_{изг}$, кН·м	—6652	—19 443	—29 278	—28 807

Продолжение

Номера участков	5	6	7	8	9
$M^{рез}_{изг}$, кН·м	—13 780	20 783	69 324	128 171	206 191

где $M^{рез}$ — изгибающие моменты, приведенные в табл. 7; $M^{c}_{vкр}$ и $M^{д}_{vкр}$ — изгибающие моменты, возникающие от действия статической и динамической составляющих ветровой нагрузки, соответствующих критической скорости ветра.

Скоростной напор, соответствующий скорости $v_{кр}=31$ м/с, $q_{vкр}=0{,}613\ v^2_{кр}=413$ Па.

Значения расчетных изгибающих моментов при вихревом возбуждении приведены в табл. 8

Таблица 8

Номерв участков	1	2	3	4	5
$M_р$, кН·м	$0{,}17\cdot10^5$	$0{,}65\cdot10^5$	$1{,}45\cdot10^5$	$2{,}58\cdot10^5$	$4{,}08\cdot10^5$

Продолжение

Номера участков	6	7	8	9
$M_р$, кН·м	$5{,}98\cdot10^5$	$8{,}29\cdot10^5$	$11{,}02\cdot10^5$	$14{,}3\cdot10^5$

Как видно, эти моменты значительно меньше моментов, возникающих от расчетной ветровой нагрузки, действующей в направлении потока.

ПРИМЕР 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ВЫСОКОЕ НЕСИММЕТРИЧНОЕ В ПЛАНЕ ЗДАНИЕ

Схема здания, его геометрические характеристики приведены на рис. 6. Формы и частоты собственных колебаний определяются как для системы с 10-ю дисками, каждый из которых имеет три степени свободы.

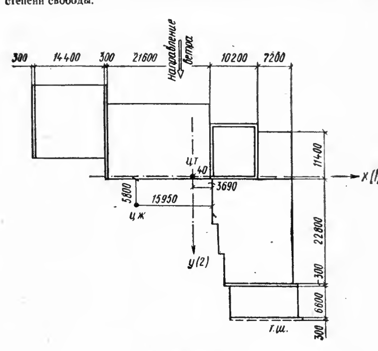


Рис. 6. Схема здания

Для зданий такого типа учитываются собственные формы поступательно вращательных колебаний, соответствующих низшим собственным частотам системы (рис. 7).

Масса единицы высоты здания $\mu = \left(\sum_{k=1}^{r} M_k \right) / H \sim 580$ т/м.

Момент инерции массы здания на единицу высоты относительно оси, проходящей через центр тяжести $I = \left(\sum_{k=1}^{r} J_k \right) / H \sim 2{,}44 \times 10^5$ т/м. Аэродинамический коэффициент $c_n = 1{,}2$; $c_t = 0$; аэродинамический эксцентриситет $e_a = 0{,}15\ B = 0{,}15 \cdot 54 = 8{,}1$ м.

Перемещения и усилия определяются для первого ветрового района и для двух типов местности Б и В.

Коэффициент пульсации для верха здания $m_Б = 0{,}56$; $m_В = 0{,}86$

$B/H = \frac{54}{90} = 0{,}6.$

Круговые собственные частоты и периоды колебания здания приведены в табл. 9

Таблица 9

Собственные частоты и периоды колебаний	i		
	1	2	3
ω_i, р/с	1,67	2,17	3,87
T_i, с	3,76	2,89	1,62

Ординаты k_i составляющих пространственной формы собственных колебаний здания на уровне его верха в направлении 1, 2 и 3, соответствующей i-ой собственной частоте, приведены в табл. 10.

Параметры A_i определяются по формуле $A_i = b_{12}k_{1i} + k_{2i} + k_{3i}e_a$.

Учитывая, что $b_{12} = c_t/c_n = 0$, получим $A_i = k_{2i} + k_{3i}e_a$.

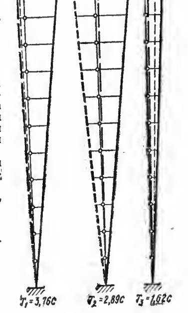


Рис. 7. Периоды и собственные формы колебаний здания

Обобщенные массы здания вычисляются по формуле

$$M_i = \frac{H}{3}\left[\mu\left(k_{1i}^2 + k_{2i}^2\right) + Jk_{3i}^2\right].$$

Значения M_i, $\mu_{1i} = \frac{T_1}{T_i}$, $\varepsilon_i = \frac{T_i v}{1200}$

и A_i приведены в табл. 11—13

Нормативное значение статической составляющей ветровой нагрузки на уровне верха здания определяется по формулам:

$q^c_{н.Б}(H) = c_n q_0 k_Б(H) = 1{,}2 \cdot 270 \cdot 1{,}72 = 557$ Па;

Таблица 10

Направление колебаний	Номер частоты i		
	1	2	3
1	13,3	−1,6	−1,5
2	0,66	11,45	−7,29
3	0,092	0,32	0,54

Таблица 11

Обобщенная масса	Номер частоты i		
	1	2	3
M_i, т	$3,15\times 10^6$	$3,08\times 10^6$	$3,1\times 10^6$

Таблица 12

Параметр μ_{li}

Номер частоты l	Номер частоты i		
	1	2	3
1	1	—	—
2	0,77	1	—
3	0,43	0,56	1

Таблица 13

Параметры	Номер частоты i		
	1	2	3
ε_i	0,07	0,07	0,05
A_i, м	1,41	14,04	2,12

$q^c_{\text{н.В}}(H)=c_n q_0 k_{\text{В}}\quad (H)=1,2\cdot 270\cdot 1,3=421$ Па.

Параметры $C_{\text{Б}}$ и $C_{\text{В}}$ вычисляются по формуле п. 6.18:

$C_{\text{Б}}=0,8165\cdot 54\cdot 90\cdot 0,56\cdot 0.557=1244$ кН;

$C_{\text{В}}=0,8165\cdot 54\cdot 90\cdot 0,86\cdot 0,421=1433$ кН.

Значения $\nu_{11}=\nu_{22}=\nu_{33}\approx 0,4$, $\nu_{21}=\nu_{31}=\nu_{32}=0,35$ следует принимать по табл. 14 Руководства.

Расчетное значение перемещения на уровне верха здания в направлении оси *2* определяется по формуле

$$y_{\text{р}}(H)=C_{\text{Б,В}}\left(\sum_{i=1}^{3}\sum_{l=1}^{3}\frac{A_i\,A_l\,\nu_{li}^2\,k_{2i}\,k_{2l}}{\omega_i^2\,\omega_l^2\,M_i\,M_l}\right)^{1/2}=C_{\text{БВ}}\left(\frac{A_1^2\,\nu_{11}^2\,k_{21}^2}{\omega_1^4\,M_1^2}+\right.$$

$$+\frac{A_2^2\,\nu_{22}^2\,k_{22}^2}{\omega_2^4\,M_2^2}+\frac{A_3^2\,\nu_{33}^2\,k_{23}^2}{\omega_3^4\,M_3^2}+2\,\frac{A_1\,A_2\,\nu_{21}^2\,k_{21}\,k_{22}}{\omega_1^2\,\omega_2^2\,M_1\,M_2}+$$

$$\left.+2\,\frac{A_1\,A_3\,\nu_{31}^2\,k_{21}\,k_{23}}{\omega_1^2\,\omega_3^2\,M_1\,M_3}+2\,\frac{A_2\,A_3\,\nu_{32}^2\,k_{22}\,k_{23}}{\omega_2^2\,\omega_3^2\,M_2\,M_3}\right)^{1/2}=$$

$$=\frac{C_{\text{Б,В}}}{10^6}\left\{\left(\frac{1,41\cdot 0,4\cdot 0,66}{(1,67)^2\cdot 3,15}\right)^2+\left(\frac{14,04\cdot 0,4\cdot 11,45}{(2,17)^2\cdot 3,08}\right)^2+\left(\frac{2,92\cdot 0,4\cdot 7,29}{(3,87)^2\cdot 3,1}\right)^2+\right.$$

$$+2\,\frac{1,41\cdot 14,04\,(0,35)^2\,0,66\cdot 11,45}{(1,67)^2\,(2,17)^2\,3,15\cdot 3,08}+$$

$$+2\,\frac{1{,}41\,(-2{,}92)\,(0{,}35)^2 0{,}66\,(-7{,}29)}{(1{,}67)^2\,(3{,}87)^2\,3{,}15\cdot 3{,}10}+$$

$$\left.+2\,\frac{14{,}04\,(-2{,}92)\,(0{,}35)^2\,11{,}45\,(-7{,}29)}{(2{,}17)^2\,(3{,}87)^2\,3{,}08\cdot 3{,}1}\right\}^{1/2}=$$

$$=\frac{C_{\text{Б,В}}}{10^6}\,4{,}61=\begin{cases}\dfrac{1244\cdot 4{,}61}{10^6}=5{,}73 \text{ мм для местности Б}\\[2mm] \dfrac{1433\cdot 4{,}61}{10^6}=6{,}61 \text{ мм для местности В}\end{cases}$$

Нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки на уровне z в направлении 2

$$q_{\text{н}}^{\text{д}}(z)=\frac{C_{\text{Б,В}}\mu z}{H}\left(\sum_{i=1}^{3}\sum_{l=1}^{3}\frac{A_i\,A_l\,k_{2i}\,k_{2l}\,v_{li}^2}{M_i\,M_l}\right)^{1/2}=$$

$$=\frac{C_{\text{Б,В}}\mu z}{H}\left(\frac{A_1^2\,v_{11}^2\,k_{21}^2}{M_1^2}+\frac{A_2^2\,v_{22}^2\,k_{22}^2}{M_2^2}+\frac{A_3^2\,v_{33}^2\,k_{23}^2}{M_3^2}+\right.$$

$$\left.+2\,\frac{A_1\,A_2\,v_{21}^2\,k_{21}\,k_{22}}{M_1\,M_2}+2\,\frac{A_1\,A_3\,v_{31}^2\,k_{21}\,k_{33}}{M_1\,M_3}+2\,\frac{A_2\,A_3\,v_{32}^2\,k_{22}\,k_{23}}{M_2\,M_3}\right)^{1/2}=$$

$$=C_{\text{Б,В}}zl\;H\,\frac{580}{10^6}\left\{\left(\frac{1{,}41\cdot 0{,}4\cdot 0{,}66}{3{,}15}\right)^2+\left(\frac{14{,}04\cdot 0{,}4\cdot 11{,}45}{3{,}08}\right)^2+\right.$$

$$+\left(\frac{2{,}92\cdot 0{,}4\cdot 7{,}29}{3{,}1}\right)^2+2\,\frac{1{,}41\cdot 14{,}04\cdot 0{,}66\cdot 11{,}45\,(0{,}35)^2}{3{,}15\cdot 3{,}08}+$$

$$+2\,\frac{1{,}41\cdot 2{,}92\cdot 0{,}66\cdot 7{,}29\,(0{,}35)^2}{3{,}15\cdot 3{,}1}+$$

$$\left.+2\,\frac{14{,}04\cdot 2{,}92\cdot 11{,}45\cdot 7{,}29\,(0{,}35)^2}{3{,}08\cdot 3{,}1}\right\}^{1/2}=$$

$$=\begin{cases}16{,}6\;z/H, \text{ кН/м, местность Б;}\\ 19{,}1\;z/H, \text{ кН/м, местность В.}\end{cases}$$

Нормативное значение возмущающего крутящего момента на единицу высоты здания, приложенного на уровне z:

$$M_{\text{н.кр}}(z)=C_{\text{Б,В}}\,Jz/H\left(\sum_{i=1}^{3}\sum_{l=1}^{3}\frac{A_i\,A_l\,k_{3i}\,k_{3l}\,v_{li}^2}{M_i\,M_l}\right)^{1/2}=$$

$$=C_{\text{Б,В}}Jz/H\left(\frac{A_1^2\,k_{31}^2\,v_{11}^2}{M_1^2}+\frac{A_2^2\,k_{32}^2\,v_{22}^2}{M_2^2}+\frac{A_3^2\,k_{33}^2\,v_{33}^2}{M_3^2}+\right.$$

$$+2\frac{A_1 A_2 k_{31} k_{32} v_{21}^2}{M_1 M_2}+2\frac{A_1 A_3 k_{31} k_{33} v_{31}^2}{M_1 M_3}+2\frac{A_2 A_3 k_{32} k_{33} v_{32}^2}{M_2 M_3}\Bigg)^{1/2}=$$

$$=C_{\text{Б,В}} z/H\,\frac{2,14\cdot 10^5}{10^6}\left\{\left(\frac{1,41\cdot 0,092\cdot 0,4}{3,15}\right)^2+\left(\frac{14,04\cdot 0,32\cdot 0,4}{3,08}\right)^2+\right.$$

$$+\left(\frac{2,92+0,54\cdot 0,4}{3,1}\right)^2+2\,\frac{1,41\cdot 14,04\cdot 0,092\cdot 0,32\ (0,35)^2}{3,15\cdot 3,08}+$$

$$+2\,\frac{1,41\,(-2,92)\,0,092\cdot 0,54)(0,35)^2}{3,15\cdot 3,1}+$$

$$\left.+2\,\frac{14,04\,(-2,92)\,0,32\cdot 0,54\,(0,35)^2}{3,08\cdot 3,1}\right\}^{1/2}=$$

$$=\begin{cases}122\,z/H, & \text{кНм/м, местность Б}\\ 141\,z/H, & \text{кНм/м, местность В.}\end{cases}$$

ПРИМЕР 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ВЫСОКОЕ СИММЕТРИЧНОЕ В ПЛАНЕ ЗДАНИЕ ТИПА ПЛАСТИНЫ

Схема здания, его геометрические характеристики и распределение сосредоточенных масс перекрытий и стен приведены на рис. 8.

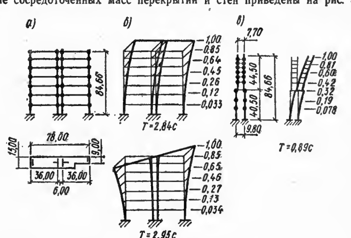


Рис. 8. Схема здания и собственные формы колебаний

а — схема здания; *б* — собственные поперечные формы колебаний здания; *в* — собственная продольная форма колебаний здания

1. Определение собственных частот и форм колебаний здания

Для рассматриваемого здания формы и частоты колебаний по каждому направлению определяются как для системы с r степенями свободы.

Для зданий такого типа, согласно п. 6.16 Руководства, учитываются только собственные формы поступательных и вращательных колебаний, соответствующие низшим собственным частотам системы. На рис. 8 приведены первые собственные формы поперечных и продольных поступательных и вращательных колебаний здания.

2. Определение перемещений крайней диафрагмы здания и действующей на нее динамической составляющей ветровой нагрузки и возмущающего крутящего момента на уровне z

Масса единицы высоты здания $\mu=\left(\sum\limits_{k=1}^{r} M_k\right)/H=622$ т/м, момент инерции массы единицы высоты здания $J=\left(\sum\limits_{k=1}^{r} J_k\right)/H=4{,}39\cdot10^5$ т.м. Аэродинамический коэффициент $c_n=1{,}3$, аэродинамический эксцентриситет $e_a=0{,}15\ B=0{,}15\cdot78=11{,}7$ м. Перемещения и ветровая нагрузка определяются для первого ветрового района и для двух типов местности Б и В.

Коэффициенты пульсации для верха здания $m_Б=0{,}56$, $m_В=0{,}89$. Круговые собственные частоты здания $\omega_2=2{,}21$ р/с; $\omega_3=2{,}13$ р/с; $A_1=k_{11}=1$; $A_2=k_{22}=1$; $A_3=k_{33}e_a=11{,}7/39=0{,}3$, $k_{33}=1/39=0{,}026$ 1/М.

Нормативное значение статической составляющей ветровой нагрузки на уровне верха здания

$q^c_{н.Б}(H)=c_n q_0 k_Б(H)=1{,}3\cdot270\cdot1{,}67=590$ Па;

$q^c_{н\ В}(H)=c_n q_0 k_В(H)=1{,}3\cdot270\cdot1{,}25=440$ Па.

Параметры $C_Б$ и $C_В$ вычисляются по формуле п. 6.18:

$C_Б=0{,}8165\cdot85\cdot78\cdot0{,}56\cdot590=1766$ кН;

$C_В=0{,}8185\cdot85\cdot78\cdot0{,}89\cdot440=2102$ кН.

Коэффициенты пространственной корреляции

$\nu_{22Б}=\nu_{33Б}=\nu_{32Б}=0{,}36$; $\nu_{22В}=\nu_{33В}=\nu_{32В}=0{,}33$,

Обобщенная масса, соответствующая поступательным колебаниям здания $M_1=\mu H/3=17564$ т; для вращательных колебаний $M_2=JHk^2_{33}/3=8150$ т.

Расчетное перемещение крайней диафрагмы на уровне верха здания в направлении 2 определяется по формуле (20) Руководства

$$y_{0рБ}(H)=\frac{3\cdot1766\cdot10}{622\cdot85\cdot2{,}21^2}\left[0{,}36^2+78\cdot11{,}7\frac{622\cdot0{,}36^2}{4{,}39\cdot10^5}\left(\frac{2{,}21}{2{,}13}\right)^2+\right.$$

$$\left.+\frac{78^2}{4}0{,}36^2\cdot11{,}7^2\left(\frac{622}{4{,}39\cdot10^5}\right)^2\left(\frac{2{,}21}{2{,}13}\right)^4\right]^{1/2}=0{,}126\ м;$$

$$y_{0рВ}(H)=0{,}137\ м,$$

Нормативное значение динамической составляющей ветровой нагрузки, действующей на крайнюю диафрагму, определяется по формуле (21) Руководства

$$q_{\text{н.инБ}}(z) = \frac{3\cdot 1766z}{85^2}\left(0{,}36^2 + \frac{2\cdot 11{,}7\cdot 0{,}36^2}{78} + \frac{11{,}7^2\cdot 0{,}36^2}{78^2}\right)^{1/2} =$$

$$= 0{,}36\,z,\ \text{кН/м};\quad q_{\text{н.инВ}}(z) = 0{,}39\,z,\ \text{кН/м}.$$

Нормативное значение возмущающего крутящего момента на уровне z определяется по формуле (22) Руководства

$$M_{\text{н.кр Б}}(z) = \frac{3C_{\text{Б}}e_a\nu_{33}}{H}\frac{z}{H} = \frac{3\cdot 1766\cdot 11{,}7\cdot 0{,}36}{85}\frac{z}{H} =$$

$$= 262\,z/H,\ \text{кНм/м};$$

$$M_{\text{н.крВ}}(z) = \frac{3\cdot 2102\cdot 11{,}7\cdot 0{,}33}{85}\frac{z}{H} = 286\,z/H,\ \text{кНм/м}.$$

ПРИМЕР 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА АППАРАТ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПО ВЫСОТЕ

1. Исходные данные

Конструктивная схема сооружения и его основные геометрические характеристики приведены на рис. 9

Место установки сооружения III район СССР по скоростному напору ветра.

Вес аппарата с заполнением в рабочем состоянии $Q_a = 6980$ кН. Модуль упругости материала аппарата $E_a = 2{,}1\cdot 10^5$ МПа. Начальный модуль упругости материала постамента $E = 2{,}65\cdot 10^4$ МПа. Плотность материала постамента $\rho = 2{,}5$ т/м³.

2. Расчетная схема сооружения

В качестве расчетной схемы аппарата принимаем консольный стержень переменного сечения, жестко заделанный в уровне верха обвязки постамента на отметке +7,2 м. Постамент представляет собой пространственную рамную систему с абсолютно жесткими обвязкой и фундаментной плитой. Фундаментная плита упруго защемлена в грунте. Расчетная схема сооружения приведена на рис. 10.

Сооружение разбиваем на отдельные участки с постоянной жесткостью, высота которых принимается не более 10 м.

Нижним участком сооружения является постамент. Массы участков аппарата считаем сосредоточенными в их центре: $M_{0-1} = 85{,}7$ т; $M_{1-2} = 88{,}3$ т; $M_{2-3} = 155{,}5$ т; $M_{3-4} = 231{,}8$ т; $M_{4-5} = 133{,}0$ т; $M_{5-6} = 18{,}1$ т.

Масса постамента, сосредоточенная в уровне его верха, равна массе обвязки и полусумме масс колонн постамента:

$$M_{\text{пост}} = \frac{250\cdot 1\cdot 3{,}14\,(4{,}2^2 - 2^2)}{4} + \frac{250\cdot 0{,}4\cdot 0{,}4\cdot 8{,}2\cdot 8}{2} = 40{,}7\ \text{т}.$$

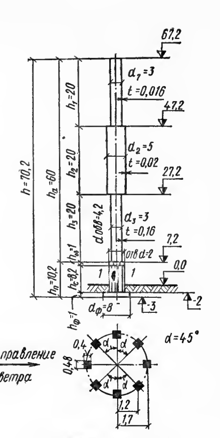


Рис. 9. Конструктивная схема

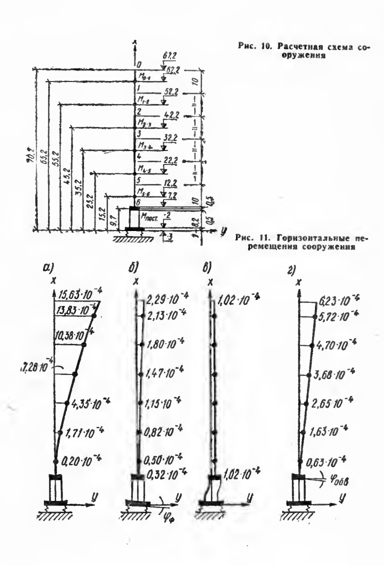


Рис. 10. Расчетная схема сооружения

Рис. 11. Горизонтальные перемещения сооружения

3. Определение периода и формы собственных горизонтальных колебаний сооружения

Период и форму основного тона горизонтальных колебаний сооружения, имеющего переменное сечение по высоте, определяют по формулам п. 7, прил. 2.

Данные для определения периода и формы собственных колебаний системы:

моменты инерции площади сечения аппарата

$J_{a1}=J_{a3}=0{,}1723$ м^4; $J_{a2}=0{,}9931$ м^4;

момент инерции площади подошвы фундаментной плиты

$$J_ф = \frac{3,14\cdot 8^4}{64} = 200,96 \text{ м}^4;$$

жесткости сечений аппарата

$E_aJ_{a1}=E_aJ_{a3}=2{,}1\cdot 10^8\cdot 0{,}1723=36{,}2\cdot 10^6$ кН/м^2;

$E_aJ_{a2}=2{,}1\cdot 10^8\cdot 0{,}9931=208{,}6\cdot 10^6$ кН/м^2.

Перемещения точек оси аппарата y_{1k}, вычисленные в предположении жесткой заделки аппарата на уровне верха постамента, даны на рис. 11.

Коэффициент упругого равномерного сжатия основания по табл. 15, прил. 2 принимаем равным $c_z=53{,}5\cdot 10^3$ кН/м^3.

Коэффициент упругого неравномерного сжатия основания $c_\varphi = 2\cdot 53{,}5\cdot 10^3 = 107\cdot 10^3$ кН/м^3.

Коэффициент жесткости при упругом повороте подошвы фундамента относительно горизонтальной оси определяем по формуле $k_\varphi=c_\varphi J_ф=107\cdot 10^3\cdot 200{,}96=21{,}5\cdot 10^6$ кН/м.

Угол поворота фундаментной плиты от единичной силы, приложенной к верху аппарата,

$$\frac{h}{k_\varphi} = \frac{70,2}{21,5\cdot 10^6} = 3,26\cdot 10^{-9}\,\text{кН}^{-1}.$$

Перемещения точек оси сооружения y_{2k} (см. п. 7, прил. 2), вызванные поворотом фундаментной плиты, вычислены в графе 6, табл. 14 и даны на рис. 11.

Сумма моментов инерции площадей сечений стоек постамента

$$\Sigma J_c = \sum_1^r (J_{jc\min}\cos^2\alpha_j + J_{jc\max}\sin^2\alpha_j),$$

где $J_{jc\min}$ — момент инерции площади сечения стойки в плоскости наименьшей жесткости; $J_{jc\max}$ — то же, в плоскости наибольшей жесткости; α_j — угол между осью, перпендикулярной направлению действия ветра, и главной осью инерции поперечного сечения, относительно которой момент инерции наибольший; r — число стоек постамента.

$$J_{jc\min} = J_{jc\max}\,\frac{0,4\cdot 0,4^3}{12} = 0,00213 \text{ м}^4;$$

$$\Sigma J_c = 4\cdot 0{,}00213 + 4\,(0{,}00213\cdot\cos^2 45^\circ + 0{,}00213\cdot\sin^2 45^\circ) = 0{,}017 \text{ м}^4.$$

Перемещения точек оси сооружения y_{3k} от единичной силы, приложенной к верху постамента:

$$y_{3k} = \frac{8,2^3}{12\cdot 2,65\cdot 10^7\cdot 0,017} = 0,102\cdot 10^{-3}\text{ м/кН},$$

Таблица 14

Номера участков	M_j, т	x_j, м	$x_j - h_п^* = x_j - (h_ф + h_c)$, м	y_{1j}, м/кН·10⁻⁴	$y_{2j} = \varphi_ф\ x_j$, м/кН·10⁻⁴	y_{3j}, м/кН·10⁻⁴	$y_{4j} = y_{об.в} \left(x_j - h_п^* \right)$, м/кН·10⁻⁴
1	3	3	4	5	6	7	8
0	—	70,2	61	15,63	2,29	1,02	6,23
0—1	85,7	65,2	56	13,83	2,13	1,02	5,72
1—2	88,3	55,2	46	10,38	1,8	1,02	4,7
2—3	155,5	45,2	36	7,28	1,47	1,02	3,68
3—4	231,8	35,2	26	4,35	1,15	1,02	2,65
4—5	133	25,2	16	1,71	0,82	1,02	1,63
5—6	18,1	15,2	6	0,2	0,5	1,02	0,61
Постамент	40,7	9,7	0,5	—	0,32	1,02	0,05

Номера участков	$y_j = y_{1j} + y_{2j} + y_{3j} + y_{4j}$, м/кН·10^{-4}	$\alpha_1(x_j) = \frac{y_j}{y_0}$	y_j^2, м²/(кН)²·10^{-8}	$M_j y_j^2$	$\frac{\sum M_j y_j^2}{y_0}$	$\sqrt{\frac{\sum M_j y_j^2}{y_0}}$	$T = 2 \cdot 3{,}14 \sqrt{\frac{\sum M_j y_j^2}{y_0}}$, с
1	9	10	11	12	13	14	15
0	25,17	1	—	—	491,88×10^{-3}	0,7	4,4
0—1	22,7	0,902	515,29	4416,04·10^{-7}			
1—2	17,9	0,711	320,41	2829,22·10^{-7}			
2—3	13,45	0,534	180,9	1813·10^{-7}			
3—4	9,17	0,364	84,09	1949,21·10^{-7}			
4—5	5,18	0,206	26,73	355,51·10^{-7}			
5—6	2,33	0,093	5,44	9,85·10^{-7}			
Постамент	1,39	0,055	1,93	7,86·10^{-7}			
				$\Sigma = 12380{,}69 \cdot 10^{-7}$			

Значения этих перемещений даны на рис. 11.

Значение $F_{\delta}\sum_{1}^{r} y_j^2 = 0,4\cdot 0,4\,(4\cdot 1,2^2+2\cdot 1,7^2) = 1,8496$ м⁴.

Угол поворота обвязки постамента, вызванный обжатием его стоек, определяем по формуле

$$\frac{h_a^* h_c}{E_c F_c \sum_{1}^{r} y_j^2} = \frac{(60+1)\,8,2}{2,65\cdot 10^7\cdot 1,8496} = 0,1021\cdot 10^{-4}\ \text{кН}^{-1}.$$

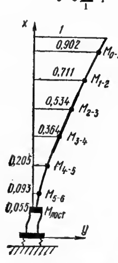


Рис. 12. Относительные ординаты формы собственных колебаний

Перемещения точек оси сооружения y_{4k} от поворота обвязки постамента вычислены в графе 8 табл. 14 и даны на рис. 11.

Вычисления формы и периода собственных колебаний сооружения приведены в табл. 14.

Относительные ординаты формы собственных колебаний сооружения приведены в графе 10 табл. 14 и даны на рис. 12.

4. Определение расчетной ветровой нагрузки

Нормативный скоростной напор ветра для III географического района $q_0 = 450$ Па.

Принимаемая в расчет скорость ветра

$$v = 1,28\sqrt{q_0\, n_п} = 1,28\sqrt{450\cdot 1,3} = 30,5\ \text{м/с},$$

параметр

$$\varepsilon_1 = \frac{T_1 v}{1200} = \frac{4,4\cdot 30,5}{1200} = 0,112.$$

Найденному значению ε_1 на графике рис. 6 Руководства соответствует коэффициент динамичности $\xi_1 = 2,4$.

Коэффициент пространственной корреляции по табл. 8 Руководства $\nu = 0,74$.

Определение расчетной ветровой нагрузки на аппарат по формуле (9) Руководства приведено в табл. 15

5. Поверочный расчет на резонанс

Расчетный диаметр аппарата принимаем равным $d = 3,03$ м. Критическую скорость ветра, вызывающую резонансные колебания, определяем по формуле (34) Руководства

$$v_{кр} = \frac{5\cdot 3,03}{4,4} = 3,44\ \text{м/с}.$$

Так как критическая скорость ветра меньше $0{,}64\sqrt{q_0} = 0{,}64\sqrt{450} = 13{,}4$ м/с, то поверочный расчет на резонанс не производится.

ПРИМЕР 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ГРУППУ ОДНОРЯДНО РАСПОЛОЖЕННЫХ АППАРАТОВ, ИМЕЮЩИХ ОБЩИЙ ФУНДАМЕНТ

1. Исходные данные

Схема групповых аппаратов, установленных на общей фундаментной плите и связанных по высоте горизонтальными площадками, приведена на рис. 13. Конструктивная схема рассматриваемого аппарата и его основные геометрические характеристики даны на рис. 14. Собственный вес обслуживающей площадки $Q_{пл} = 20$ кН. Период основного тона свободных колебаний наиболее высокого аппарата в направлении, перпендикулярном оси ряда, $T = 1{,}8$ с.

2. Расчетная схема сооружения

В качестве расчетной схемы сооружения принят консольный стержень постоянного сечения, упругозаделанный в уровне верха фундаментной плиты на отметке 2,3 м.

Расчетная схема приведена на рис. 14.

Массы площадок равны: $M_{пл1} = M_{пл2} = M_{пл3} = M_{пл4} = 2{,}04$ т.

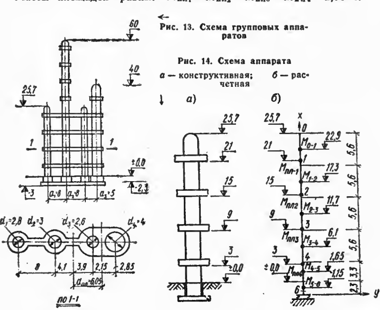


Рис. 13. Схема групповых аппаратов

Рис. 14. Схема аппарата

а — конструктивная; *б* — расчетная

Номера участков сооружения	Высота участка h_k, м	Диаметр участка d_k, м	Масса участка M_k, м	Коэффициенты			
				заполнения участка аппарата φ_k	лобового сопротивления c_{xk}	возрастания скоростного напора $k\ (z_k)$	пульсации скоростного напора m_k
0—1	10	3,03	85,7	1,1	0,7	1,77	0,46
1—2	10	3,03	88,3	1,1	0,7	1,67	0,47
2—3	10	5,04	155,5	1,1	0,7	1,57	0,48
3—4	10	5,04	231,8	1,1	0,7	1,43	0,51
4—5	10	3,03	133	1,1	0,7	1,28	0,54
5—6	10	3,03	18,1	1,1	0,7	1,06	0,59
Постамент	10	3,8	40,7	1	1,4	1	0,6

3. Определенне пернода н формы собственных горнзонтальных колебанний сооружения

Период основиого тона собствениых колебаний рассматриваемого аппарата, согласио п. 7, прил. 2, прииимаем равным перноду собственных колебаиий ианболее высокого аппарата $T = 1{,}8$ с.

Даииые для определеиия собствениых форм колебаиий аппарата:

собственная круговая частота сооружеиия

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14}{1,8} = 3,49 \text{ р/с};$$

масса едииицы высоты аппарата

$$\mu = 2,9 + \frac{2,04\,(0,02 + 0,21 + 0,95 + 2,35)}{28} = 3,16 \text{ т};$$

коэффициент частоты определяем по формуле (179), п. 7, прил. 2

$$\lambda = 28 \sqrt{\frac{3,16 \cdot 3,49^2}{2,1 \cdot 10^8 \cdot 0,0549}} = 1,2.$$

Таблица 15

Статическая составляющая ветровой нагрузки $Q^{c}_{нk} = q_c h_k d_k c_{xk} k(z_k)\varphi_k$, кН	Относительные ординаты формы собственных колебаний сооружения α_{1k}	Обобщенная сила $\sum_{k=1}^{r} m_k \alpha_{1k} Q^{c}_{нk}$	Обобщенная масса $\sum_{k=1}^{r} M_k \alpha^2_{1k}$	$A = \frac{\sum_{k=1}^{r} Q^{c}_{нk}\alpha_{1k} m_k}{\sum_{k=1}^{r} M_k \alpha^2_{1k}}$	Приведенное ускорение $\eta_{1j} = \alpha_{1j} A$	Ветровая нагрузка: динамическая составляющая $Q^{д}_{нj} = M_j \eta_{1j} \xi_1 \nu$, кН	Ветровая нагрузка: расчетная $Q_j = \left(Q^{c}_{нj} + Q^{д}_{нj}\right) n_п$, кН
18,57	0,90	7,67	69,7		0,128	19,49	49,48
17,55	0,71	5,84	44,6		0,101	15,83	43,4
27,45	0,53	7,01	44,3		0,076	20,93	62,9
25,03	0,36	4,62	30,7	0,142	0,052	21,27	60,19
13,47	0,21	1,50	5,6		0,029	6,91	26,49
11,08	0,09	0,61	1,6		0,013	0,42	14,95
14,52	0,06	0,48	1,2		0,008	0,56	19,61
		$\Sigma = 27,73$	$\Sigma = 195,3$				

Относительные ординаты формы собственных колебаний аппарата приведены на рис. 15.

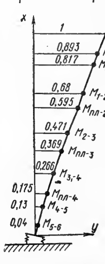


Рис. 15. Относительные ординаты формы собственных колебаний

4. Определение расчетной ветровой нагрузки

Ветровую нагрузку определяем для направления ветра, действующего поперек ряда аппаратов.

Данные для подсчета ветровой нагрузки: коэффициент заполнения обслуживающих площадок

$$\varphi_{пл} = \frac{1\cdot 0,3 + 0,5\cdot 1}{1 + 0,5} = 0,53.$$

По п. 19, табл. 1, прил. 1 при отношении

$$\frac{a_3}{d_{ср}} = \frac{5}{0,5\,(4 + 2,6)} = 1,5$$

находим значение коэффициента $\eta_2 = 1,16$;

Номера участков сооружения	Высота участка h_k, м	Диаметр участка d_k, м	Масса участка M_k, т	Коэффициенты			
				заполнения участка аппарата φ_k	лобового сопротивления c_{xk}	возрастания скоростного напора k (z_k)	пульсации скоростного напора m_k
0—1	5,6	2,6	16,22	1,1	0,81	1,29	0,54
ПЛ-1	1,3	6,75	2,04	0,53	1,4	1,27	0,55
1—2	5,6	2,6	16,22	1,1	0,81	1,18	0,57
ПЛ-2	1,3	6,75	2,04	0,53	1,4	1,13	0,58
2—3	5,6	2,6	16,22	1,1	0,81	1,04	0,59
ПЛ-3	1,3	6,75	2,04	0,53	1,4	1	0,6
3—4	5,6	2,6	16,22	1,1	0,81	1	0,6
ПЛ-4	1,3	6,75	2,04	0,53	1,4	1	0,6
4—5	3,3	2,6	9,56	1,1	0,81	1	0,6
5—6	2,3	—	13,82	—	—	—	—

аэродинамический коэффициент для аппарата

$$c_x = 0{,}7 \cdot 1{,}16 = 0{,}81;$$

нормативный скоростной напор для II района

$$q_0 = 350 \text{ Па}.$$

Принимаемая в расчет скорость ветра

$$v = 1{,}28\sqrt{q_0\, n_п} = 1{,}28\sqrt{350 \cdot 1{,}3} = 27 \text{ м/с};$$

Статическая составляющая ветровой нагрузки $Q^c_{нk} = q_0 h_k d_k c_{xk} k(z_k)\varphi_k$, кН	Относительные ординаты формы собственных колебаний сооружения α_{1k}	Обобщенная сила $\sum_{k=1}^{r} m_k \alpha_{1k} Q^c_{нk}$	Обобщенная масса $\sum_{k=1}^{r} M_k \alpha^2_{1k}$	$A = \dfrac{\sum_{k=1}^{r} Q^c_{нk}\alpha_{1k} m_k}{\sum_{k=1}^{r} M_k \alpha^2_{1k}}$	Приведенное ускорение $\eta_{1j} = \alpha_{1j} A$	Ветровая нагрузка: динамическая составляющая $Q^д_{нj} = M_j \eta_{1j} \xi_1 \nu$, кН	Ветровая нагрузка: расчетная $Q_j = \left(Q^c_{нj} + Q^д_{нj}\right) n_п$, кН
6,29	0,89	2,8	12,9	0,362	0,32	6,81	16,5
2,88	0,82	1,29	1,36		0,3	0,78	4,77
5,39	0,68	2,07	7,5		0,25	5,1	13,7
2,56	0,6	0,88	0,72		0,22	0,57	4,08
4,74	0,47	1,32	3,6		0,17	3,59	10,8
2,28	0,37	0,51	0,22		0,13	0,35	3,42
4,55	0,27	0,73	1,15		0,1	2,02	8,54
2,28	0,18	0,24	0,06		0,06	0,17	3,18
2,68	0,13	0,21	0,163		0,05	0,58	4,24
—	0,04	—	0,02		0,015	0,27	0,35
		Σ=10,072	Σ=27,79				

параметр

$$\varepsilon_1 = \frac{1,8 \cdot 27}{1200} = 0,04,$$

Найденному значению ε_1 соответствует коэффициент динамичности $\xi_1 = 1,85$. Коэффициент $\nu = 0,7$. Определение расчетной ветровой нагрузки приведено в табл. 16.

5. Поверочный расчет на резонанс

Согласно п. 7.12, групповые аппараты на резонанс не проверяются.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ТАБЛИЦА СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ НЕКОТОРЫМИ ЕДИНИЦАМИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН СИСТЕМЫ СИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МКГСС

Наименование величины	Единица				Соотношение единиц
	СИ		МКГСС		
	наименование	обозначение	наименование	обозначение	
Масса	килограмм	кг	—	кгс^2/м	1 кг ~ 9,8 кгс^2/м ~ ~ 10 кгс^2/м
Сила, нагрузка, вес	Ньютон	Н	килограмм-сила; тонна-сила	кгс тс	1Н ~ 0,102 кгс ~ 0,1 кгс 1 кН ~ 0,102 тс ~ 0,1 тс
Линейная нагрузка	Ньютон на метр	Н/м	килограмм-сила на метр	кгс/м	1 Н/м ~ 0,1 кгс/м
Поверхностная нагрузка	Ньютон на квадратный метр	Н/м^2	килограмм-сила на квадратный метр	кгс/м^2	1 Н/м^2 ~ 0,1 кгс/м^2
Давление	Паскаль	Па	килограмм-сила на квадратный сантиметр	кгс/см^2	1 Па ~ 0,102·10^{-4} кгс/см^2 ~ 0,1 кгс/м^2
Механическое напряжение	Паскаль	Па	килограмм-сила на квадратный миллиметр	кгс/мм^2	1 МПа ~ 0,102 кгс/мм^2 ~ ~ 0,1 кгс/мм^2
Модуль продольной упругости; модуль сдвига; модуль объемного сжатия	Паскаль	Па	Килограмм-сила на квадратный сантиметр	кгс/см^2	1 МПа ~ 10,2 кгс/см^2 ~ ~ 10 кгс/см^2
Момент силы	Ньютон-метр	Н·м	Килограмм-сила-метр	кгс·м	1 Н·м ~ 0,102 кгс·м ~ ~ 0,1 кгс·м

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анапольская Л. Е., Гандин Л. С.** Режим больших скоростей ветра на территории СССР для учета ветровых нагрузок на сооружения. — Вопросы прикладной климатологии. Л., Гидрометеоиздат, 1966.
2. **Барштейн М. Ф.** Динамический расчет высотных сооружений цилиндрической формы. — Сб. «Исследования по динамике сооружений». М., Стройиздат, 1957.
3. **Барштейн М. Ф.** Воздействие ветра на высокие сооружения. Строительная механика и расчет сооружений, 1959, № 1.
4. **Барштейн М. Ф., Амирасланов Н. А.** Поступательно-вращательные колебания протяженных в плане сооружений при землетрясении. Строительная механика и расчет сооружений, 1970, № 6.
5. **Барштейн М. Ф.** Воздействие ветра на здания и сооружения. Труды ЦНИИСК, вып. 21, 1973.
6. **Барштейн М. Ф.** Некоторые вопросы динамического расчета высоких сооружений на действие ветра. Труды конференции по аэродинамике и аэроупругости высоких строительных сооружений. Изд. ЦАГИ, 1974.
7. **Барштейн М. Ф.** Ветровая нагрузка на здания и сооружения. Строительная механика и расчет сооружений, 1974, № 4.
8. **Барштейн М. Ф.** Динамический расчет высоких зданий на действие ветра. Строительная механика и расчет сооружений, 1974, № 6.
9. **Барштейн М. Ф., Бериштейн А. С.** Динамика мачт на вантах при действии ветра. Труды ЦНИИСК., вып. 56. М., 1975.
10. **Барштейн М. Ф., Бериштейн А. С., Шкляревский П. К.** Воздействие ветра на большеразмерные стекла витрин. Труды ЦНИИСК, вып. 56. М., 1975.
11. **Барштейн М. Ф., Бериштейн А. С.** Воздействие ветра на линейно-протяженные сооружения. Труды конференции по динамике строительных конструкций. Братислава, 1977.
12. **Бериштейн А. С.** Колебания вант, подкрепляющих мачты, под действием случайных сил. Труды ЦНИИСК, вып. 17. 1971.
13. **Бернштейн А. С.** О динамическом расчете мачт на действие ветра. Строительная механика и расчет сооружений, 1973, № 2.
14. **Блюмина Л. Х. и Захаров Ю. Г.** Колебания цилиндрических тел в воздушном потоке. — Сб. «Исследования по динамике сооружений». М., Стройиздат, 1957.
15. **Болотин В. В.** Статистические методы в строительной механике. М., Госстройиздат, 1965.
16. **Болотин В. В.** Применение методов теории вероятностей в теории надежности и в расчетах сооружений. М., Стройиздат, 1971.
17. **Болтухов А. А.** Расчет градирен на ветровую нагрузку. Строительная механика и расчет сооружений, 1960, № 4.
18. **Борисенко М. М.** Вертикальные профили ветра и температуры в нижних слоях атмосферы. Труды Главной Геофизической обсерватории им. В. А. Воейкова, 1974, № 320.
19. **Виниченко Н. К., Пинус Н. З., Шметер С. М., Шур Г. Н.** Турбулентность в свободной атмосфере. Л., Гидрометеоиздат, 1968.
20. **Гумбель Э.** Статистика экстремальных значений. М., Мир, 1965.
21. **Ден-Гартог.** Механические колебания. Физматиздат, 1960.
22. **Заварина М. В.** Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы. Л., Гидрометеоиздат, 1971.

23. **Иванов В. Н., Мазурин Н. Ф.** Некоторые турбулентные характеристики пограничного слоя атмосферы, используемые в прикладных задачах. Труды конференции по аэродинамике и аэроупругости высоких строительных сооружений, изд. ЦАГИ, 1974.
24. **Инструкция** по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки. М., Стройиздат, 1970.
25. **Инструкция** по проектированию железобетонных дымовых труб. М., Госстройиздат, 1962.
26. **Клепиков Л. В.** Статистический анализ данных о скорости ветра в различных районах СССР. Труды ЦНИИСК, вып. 42. М., Стройиздат, 1976.
27. **Клепиков Л. В., Отставнов В. А.** Определения нагрузок при расчете строительных конструкций. Строительная механика и расчет сооружений, 1962, № 5.
28. **Климатологический** справочник СССР, часть III. Л., Гидрометеоиздат, 1967.
29. **Колмогоров А. Н.** Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. ДАН СССР, т. 30, 1941, № 4.
30. **Ламли Д., Пановский Г.** Структура атмосферной турбулентности. Мир, 1966.
31. **Луговцов А. Н.** Колебания типа «Ветровой резонанс» цилиндрических конструкций. — Сб.: «Колебания зданий и сооружений». М., Госстройиздат, 1963.
32. **Монин А. С.** Структура атмосферной турбулентности. Теория вероятностей и ее приложения. т. III, вып. 5, изд-во АН СССР, 1958.
33. **Мэррис А.** Обзор исследований по вихревым дорожкам, периодическим следам и индуцированным явлениям вибраций. — Журнал. Теоретические основы инженерных расчетов. Серия Д., т. 86, 1964, № 2.
34. **Новожилов В. В.** Теория тонких оболочек. Судпромгиз, 1962.
35. **Онишвили О. Д.** Некоторые динамические задачи теории оболочек. М., изд-во АН СССР, 1957.
36. **Савицкий Г. А.** Основы расчета радиомачт. Связьиздат, 1953.
37. **Савицкий Г. А., Попов С. Г.** Об аэродинамических силах, действующих на круговой цилиндр при его колебаниях в потоке. — Сб.: «Вопросы механики». Изд-во МГУ, 1961.
38. **Савицкий Г. А.** Ветровая нагрузка на сооружение. М., Стройиздат, 1972.
39. **Смирнов А. Ф.** Устойчивость и колебания сооружений. Трансжелдориздат, 1958.
40. СНиП II-6-74. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. М., Стройиздат, 1976.
41. **Соколов А. А.** Опоры линий передачи. Госстройиздат, 1961.
42. **Соколов А. Г.** Металлические конструкции антенных устройств. М., Стройиздат, 1971.
43. **Современное** состояние гидроаэромеханики вязкой жидкости. Под ред. С. Гольдштейна. М., 1948.
44. **Теодорчик К. Ф.** Автоколебательные системы. ГГТИ, 1952.
45. **Тупикин А. И.** Исследования свободных колебаний оболочки градирни методом конечных элементов. Труды ЦНИИСК, вып. 43, 1975.
46. **Федяевский К. К., Блюмина Л. Х.** Силы вихревой природы, дей-

ствующие на вынужденно колеблющийся цилиндр. — Сб.: Труды конференции по аэродинамике и аэроупругости высоких строительных сооружений. Изд-во ЦАГИ, 1974.
47. Фомин Г. М., Блюмина Л. Х., Соколов А. Г., Беспрозванная И. М. Проблемы исследования аэродинамических и аэроупругих характеристик высоких строительных сооружений. Труды конференции по аэродинамике и аэроупругости высоких строительных сооружений. Изд-во ЦАГИ, 1974.
48. Царицына И. В., Самокиш Б. А. Построение неосесимметричных собственных форм оболочек вращения методом конечных элементов. Изд. ВНИИГ, т. 103, 1973.
49. American National Standard. Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and other Structures. ANSI A58. 1—1972.
50. Berman S. Estimating the Longitudinal Wind Spectrum near the Ground. Quart. J. Roy. Met. Soc. vol. 91, 1965.
51. Carter R. L., Robinson A. R. and Schnobrich W. C. Free Vibrations of Hyperboloidal Shells of Revolution. J. Eng. Mech. Div. ASCE. Oct. 1969.
52. Cincotta I. I., Jones G. W., Walker R. W. Experimental Investigation of Wind — Induced Oscillation Effects on Cylinder in Two Dimensional Flow at High Reynolds Numbers. Meeting on Ground Wind Load Problems in Relation to Launch Wehicles. Nasa Langley Research Center, 1966.
53. Cramer H. E. Measurements of Turbulence Structure Near Ground within the Frequency Range from 0,5 to 0,01 Cycles Sec^{-1}. Advances in Geophysics. Academic Press, New York, 1959.
54. Davenport. The Response of Slender Line — Like Structures to a Gusty Wind. Proc. Inst. of Civil Engineers, London, v. 23, 1962.
55. Davenport A. G. The Treatment of Wind Loading of Tall Building. Proc. Sym. on Tall Build. Univ. of Sauthampton, 1966.
56. Davenport A. G. The Dependence of Wind Loads on Meteorological Parametres. Proc. of Inter. Res. Seminar of Wind Effects on Buildings and Structures. Ottawa, 1967.
57. Davenport A. G. Gust Loading Factors. J. of the Structural Division, Proc. ASCE, 1967.
58. Davenport A. G., Vickery B. I. A Comparison of Theoreticall and Experimental Determination of the Response of Elastic Structures. Symposium on Wind Effects on Structures. Ottawa, 1967.
59. Duchene — Marullaz. Full — Scale Measurements of Atmospheric Turbulence in a Suburban Area. Proc. of the Fourth Inter. Conference of Wind Effects on Building and Structures. London, 1975.
60. Förschlng H. Grundlagen der Aeroelastik. Berlin, Springer — Verlag, 1974.
61. Fu-Kuei Chang. Human Response to Motions in Tall Buildings. J. of the Structural Division. June, 1973.
62. Fung Y. C. Fluctuating Lift and Drag Action on a Cylinder in a Flow at Supercritical Reynolds Numbers, J. of the Aerospace Sciens. v. 27, 1960.
63. Hashish M. G. and Abu-Sitta S. H. Free Vibrations of Hyperbolic Cooling Towers. J. Eng. Mech. Div. ASCE, April, 1971.
64. Hashish M. G. and Abu-Sitta S. H. Response of Hyperbolic Cooling Towers to Turbulent Wind. J. of the Structural Division ASCE, vol. 100, No. St5, May 1974.

65. **Hino M.** Spectrum of Gusty Wind. Proc. of Third Inter. Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Tokyo, 1971.
66. **Jensen M., Franc N.** Model — Scale Tests in Turbulent Wind. Part II. Copenhagen, 1965.
67. **Kaimal J. C.** Wyngaard, Izumi Y. and Cote O. R. Spectral Characteristics of Surface — Layer Turbulence. Quart. J. Roy. Met. Soc. 98, 1972.
68. **Niemann H.** Wind Pressure Measurements on Cooling Towers. Proc. IASS Conference on Tower Shaped Structures, The Hague. April, 1969.
69. **Normes** pour les charges la mise en service et la surveillance des constructions. Societe Suisse des Ingeniers et des Architectes, 1956.
70. **Novak M.** Aeroelastic Galloping of Rigid and Elastic Bodies. The University of Western Ontario BLWT-3-68, 1968.
71. **Novak M., Fischer O.** On the Lift Forces on a Cylinder Vibrating in Air Flow. Acta Technica, ČSAV, № 6, 1969.
72. **Novak M., Davenport A. G.** Aeroelastic Instability of Prisms in Turbulent Flow. J. of the Eng. Mech. Div. Proc. ASCE Feb. 1970.
73. **Parkinson G. V.** Aeroelastic Galloping in One Degree of Freedom. Proc. Symp. Wind Effects on Buildings and Structures. NPL. Teddington, 1965.
74. **Parkinson G. V.** Wind — Induced Instability of Structures. Phil. Trans. Roy. Soc. London, A. 269, 1971.
75. **Regles** definissant les effects de la neige du vent sur les constructions. 1965.
76. **Recommended** Practice for the Design and Construction of Reinforced Concrete Cooling Tower Shells. Reported by the Sub Committee on Hyperbolic Cooling Towers of the ASCE—ACI Task Committee on Concrete Shell Design and Construction. ACI—ASCE Committee 334.
77. **Roshko A.** Experiments on the Flow Past a Circular Cylinder at Very High Reynolds Numbers. J. of Fluid. Mech. v. 10, 1961.
78. **Scruton C.** On the Wind Excited Oscillations of Stacks, Towers and Masts. Proc. Symp. Wind Effects on Buildings and Structures. NPL, Teddington, 1965.
79. **Tall Building.** Criteria and Loading. Vol. CL. Chapter 7, Wind Loading and Wind Effects, 1975.
80. **Van der Hoven J.** Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 cycles per Hour. J. of Met., v. 14, 1957.
81. **Vickery B. I.** Load Fluctuations In Turbulent Flow. J. of the Eng. Mech. Division. Proc. ASCE, Febr. 1968.
82. **Vickery B. I., Clark A. W.** Lift or Across — Wind Response of Tapered Stacks. J. of the Structural Division Proc. ASCE, Jan. 1972.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр

ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко

**Руководство
по расчету зданий и сооружений
на действие ветра**

Редакция инструктивно-нормативной литературы
Зав. редакцией *Г. А. Жигачева*
Редактор *С. В. Беликина*
Мл. редактор *Л. Н. Козлова*
Технический редактор *Ю. Л. Циханкова*
Корректоры *Г. А. Кравченко, И. В. Медведь*

Сдано в набор 27.03.78. Подписано в печать 31.07.78. Т-11372. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага тип. № 3. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. 11,76 усл. печ. л. (12,64 уч.-изд. л.). Изд. № XII—7597. Зак. № 514. Тираж 40 000 экз. Цена 65 коп.

Стройиздат
103006, Москва, Каляевская, 23а

**Владимирская типография «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7**

ВНИМАНИЮ РУКОВОДИТЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ!

В 1979 году Стройиздатом будут выпущены издания, рассчитанные на специалистов узкого профиля.

Индивидуальные покупатели оформляют заказы на почтовых открытках с указанием обратного адреса, а учреждения и предприятия — гарантийными письмами и сдают их в местные книжные магазины, распространяющие научно-техническую литературу.

Специалистам будут предложены:

I. ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

1. Научная литература

Белинский А. Ю., Фурен В. М. **Пассажирский транспорт в градостроительстве Севера.** — Л.: Стройиздат, 1979 (III кв.). — 10 л., ил. — В пер.: 1 р. 5 к. 3000 экз. 30203

Рассматриваются принципиальные положения и конкретные приемы градостроительного формирования экономически эффективных систем транспортного обслуживания населения зоны. БАМа, Западной Сибири и других регионов Крайнего Севера. Содержатся оригинальные методические рекомендации по проектированию транспортно-планировочных систем на Севере, отражающие существующий уровень исследований затрагиваемых вопросов. Дается обзор современных градостроительных и транспортно-планировочных достижений в нашей стране и за рубежом.

Книга предназначена для научных работников и проектировщиков.

План 1979 г., № 292

Графо-аналитический метод в градостроительных исследованиях и проектировании/Центр. науч.-исслед. и проектный ин-т по градостроительству. — М.: Стройиздат, 1979 (II кв.). — 15 л., ил. — 1 р. 70 к. 3000 экз. 30204

В книге излагаются графо-аналитический метод метрических оценок городских транспортно-планировочных ситуаций, его модификация, возможные направления развития, а также приводятся примеры применения этого метода в градостроительных исследованиях и проектировании.

Книга рассчитана на градостроителей и проектировщиков.

План 1979 г., № 293

II. СТРОИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

1. Производственно-техническая литература

Васьковский А. П., Шкляров Н. Д. **Конструкции гражданских зданий для строительства на Севере.** — Л.: Стройиздат, 1979 (III кв.). — 10 л., ил. — 55 к. 3000 экз. 30205

Рассматриваются конструктивные схемы зданий, обеспечивающие их устойчивость и жесткость, а также конструктивные элементы и их соответствие условиям Севера. Даются рекомендации по проектированию и изготовлению различных строительных конструкций. Приводятся соображения и технико-экономические данные по применению на Севере местных и привозных конструкций из эффективных материалов.

Книга предназначена для проектировщиков.

План 1979 г., № 294

Горенштейн Б. В. **Железобетонные пространственные конструкции для строительства на Севере.** — Л.: Стройиздат, 1979 (IV кв.). — 10 л., ил. — 55 к. 3000 экз. 30205

Рассмотрены методы компоновки, расчета и проектирования железобетонных пространственных покрытий с учетом специфических условий Севера. Изложены методы изготовления и возведения этих конструкций. Особое внимание уделено обобщению опыта возведения оболочек в Красноярском крае.

Книга предназначена для проектировщиков.

План 1979 г., № 295

Заславский И. Н., Флакс В. Я., Чернявский В. Л. **Долговечность зданий и сооружений предприятий черной металлургии.** — М.: Стройиздат, 1979 (III кв.). — 5 л., ил. — 25 к. 3000 экз. 30205

Описаны условия эксплуатации строительных конструкций цехов рудоподготовительного, коксохимического и металлургического производств, характер и интенсивность их износа. Приведена классификация указанных объектов по виду и интенсивности износа строительных конструкций. Рассмотрены способы обеспечения их долговечности в условиях коррозионных, температурных, ударных, абразивных и других видов эксплуатационных воздействий. Показана экономическая эффективность применяемых способов антикоррозионной защиты строительных конструкций.

Книга предназначена для инженерно-технических работников проектных организаций.

План 1979 г., № 296

Лампси Б. Б. **Металлические тонкостенные несущие конструкции при локальных нагрузках.** — М.: Стройиздат, 1979 (IV кв.). — 15 л., ил. — 80 к. 4000 экз. 30205

Изложена предложенная автором общая теория местных напряжений в металлических тонкостенных конструкциях, работа которых впервые рассмотрена с позиции теории упругости; рассмотрены также задачи упругопластической работы тонкостенных стержней и условия достижения ими первого предельного состояния (предельного равновесия). Исследование доведено до рабочих приемов расчета путем широкого табулирования и графического представления необходимых для него данных.

Книга предназначена для инженерно-технических работников проектных и научно-исследовательских организаций.

План 1979 г., № 297

Макагонов В. А. **Ультразвуковой контроль бетона после воздействия высоких температур.** — М.: Стройиздат, 1979 (III кв.).— 5 л., ил. — 25 к. 3000 экз. 30205

Рассмотрены вопросы определения технического состояния бетонных и железобетонных конструкций при кратковременном воздействии повышенных и высоких температур и после этого воздействия. Показана возможность установления температуры в одно-, двух- и трехслойных конструкциях на основании данных такого контроля, а также связи между температурой бетона и скоростью распространения ультразвуковых импульсов. Приведены данные об изменении физико-механических характеристик различных бетонов в зависимости от режима последующего охлаждения, о характере взрывоопасного разрушения. Установлена связь между температурными полями и изменениями прочности по сечению реальных конструкций при их одностороннем нагреве.

Книга предназначена для инженерно-технических работников проектных и строительных организаций.

План 1979 г., № 298

Чеховский Ю. В., Грайфер А. Г. **Железобетонные сооружения для хранения и транспортирования газов.** — М.: Стройиздат, 1979 (III кв.). — 6 л., ил. — 30 к. 4000 экз. 30205

Описаны способы повышения плотности и понижения проницаемости бетона, применяемого при строительстве резервуаров и трубопроводов для хранения и транспортирования газов и легких нефтепродуктов. Даны основные представления о структуре пор бетона и механизмах переноса через них газов. Показано влияние различных видов уплотнения, тепловой обработки и химических добавок на газопроницаемость бетона. Рассмотрен опыт строительства, испытания и эксплуатации железобетонных сооружений для хранения и транспортирования газо́в.

Книга предназначена для инженерно-технических работников промышленности сборного железобетона и строительных организаций.

План 1979 г., № 299

2. Научная литература

Гончаров Ю. М., Малков Е. Н., Комзина А. А. **Вопросы надежности жилых зданий, эксплуатируемых в районах Севера.** — Л.: Стройиздат, 1979 (IV кв.). — 10 л., ил. — 1 р. 50 к. 3000 экз. **30205**

Посвящена актуальным вопросам проектирования и строительства зданий и сооружений с учетом суровых климатических условий. Изложены данные о прочностных, деформативных свойствах засоленных вечномерзлых грунтов, их несущей способности и влиянии на прочность и устойчивость здания в период эксплуатации.

Книга предназначена для научных работников, проектировщиков и строителей.

План 1979 г., № 300

III. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. Производственно-техническая литература

Гуревич В. Г., Абрамсон В. Ш. **Обезвоживание нерудных строительных материалов при низких температурах.** — Л.: Стройиздат, 1979 (III кв.). — 5 л., ил. — 30 к. 3000 экз. **30209**

На основе отечественного и зарубежного опыта обобщаются современные способы обезвоживания нерудных строительных материалов в условиях низких температур. Определяется область их применения, даются рекомендации обезвоживающему оборудованию и методам его расчета.

Книга предназначена для инженерно-технических работников промышленности нерудных строительных материалов.

План 1979 г., № 301

2. Научная литература

Баумштейн И. П. **Автоматизированные системы управления тепловыми процессами в керамической и стекольной промышленности.** — Л.: Стройиздат, 1979 (I кв.). — 6 л., ил. — 80 к. 3000 экз. **30209**

Приведена классификация и дана краткая характеристика процессов и аппаратов, применяемых для тепловой обработки материалов в керамической и стекольной промышленности. Приведены различные варианты математических моделей туннельных, конвейерных и распылительных сушилок и печей обжига, керамических плиток, а также аппаратов в производстве строительного кирпича.

Книга предназначена для научных работников и проектировщиков.

План 1979 г., № 302

Гельфанд Я. Е. **Статистические методы в управлении цементным производством.** — Л.: Стройиздат, 1979 (III кв.). — 8 л., ил. — 1 р. 20 к. 3000 экз. **30209**

Рассматриваются вопросы применения статистических методов для исследования технологических процессов производства цемента и синтеза статистически оптимальных, субоптимальных и самонастраивающихся систем управления. Приводятся алгоритмы управления и особенности их реализации в АСУТП цементного производства. Излагаются методы прогнозирования эффективности субоптимальных систем и основы экономически оптимального проектирования.

Книга предназначена для научных работников и проектировщиков.

План 1979 г., № 303

Кучеров О. Ф., Маневич В. Е., Клименко В. В **Автоматизированные системы управления производством стекла.** — Л.: Стройиздат, 1979 (IV кв.). — 10 л., ил. — 80 к. 300 экз. **30209**

Излагаются вопросы создания автоматизированных систем управления в производстве листового стекла. Приводятся методика и примеры расчетов по оптимальному выбору оборудования и прогнозированию экономической эффективности систем управления, а также по математическому моделированию основных технологических процессов производства стекла.

Книга предназначена для научных работников и проектировщиков.

План 1979 г., № 304

IV. ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1. Производственно-техническая литература

Апарин И. Л., Криницкая М. Е. **Индустриальная база строительства в северной зоне:** (Проблемы развития и размещения). — Л.: Стройиздат, 1979 (II кв.). — 12 л., ил. — 75 к. 3000 экз. **30207**

Анализируется роль индустриальной базы в повышении эффективности строительства в северной зоне, намечаются пути повышения технико-экономического уровня работ. Значительное место отводится вопросам формирования отраслевой и территориальной структуры строительства. Освещаются методы создания опорно-тыловых баз как основы индустриализации строительства на Севере.

Книга предназначена для инженерно-технических работников проектных, строительных и планирующих организаций.

План 1979 г., № 305

Лепиев М. И., Потапов В. И. **Разогрев смерзшихся грузов на установках с инфракрасными излучателями.** — Л.: Стройиздат, 1979 (II кв.). — 6 л., ил. — (Наука — строит. производству). — 30 к. 3000 экз. **30207**

Рассматриваются вопросы перевозок смерзшихся грузов на предпрятиях стройиндустрии, дается оценка смерзания грузов с учетом климатических зон и дальности перевозки. Приводятся существующие в нашей стране и за рубежом средства восстановления сыпучести и выгрузки смерзшихся грузов. Рассматривается возможность использования для этой цели установок с газовыми инфракрасными излучателями и других высокопроизводительных механизмов на предприятиях стройиндустрии.

Книга предназначена для инженерно-технических работников предприятий стройиндустрии.

План 1979 г., № 306

Попов Ю. А., Рощупкин Д. В. **Гидромеханизация земляных работ в зимнее время.** — Л.: Стройиздат, 1979 (I кв.) — 12 л., ил. — В пер.: 75 к. 3000 экз. **30207**

Содержатся рекомендации по внедрению эффективных методов производства земляных работ способом гидромеханизации в зимних условиях. Приведены технические данные наиболее совершенного вспомогательного оборудования для эффективной эксплуатации в зимних условиях. Значительное внимание уделяется вопросам техники безопасности.

Книга предназначена для строителей и эксплуатационников.

План 1979 г., № 307

V. ФУНДАМЕНТОСТРОЕНИЕ

1. Производственно-техническая литература

Растегаев И. К. **Технология и механизация работ по строительству свайных фундаментов на вечномерзлых грунтах.** — Л.: Стройиздат, 1979 (III кв.). — 6 л., ил. — 30 к. 3000 экз. **30206**

На основе обобщения опыта строительства Норильска, Магадана, Якутска, Воркуты рассматриваются современные средства механизации и технологии строительства свайных фундаментов на вечномерзлых грунтах. Особое внимание уделяется устройству свайных фундаментов на грунтах твердомерзлого и пластичномерзлого состояния. Даются сведения о средствах для понижения температуры грунтов и испытаниях свай.

Книга предназначена для инженерно-технических работников.

План 1979 г., № 308

2. Научная литература

Морарескул Н. Н. **Основання и фундаменты в торфяных грунтах.** — Л.: Стройиздат, 1979 (II кв.). — 5 л., нл. — 75 к. 3000 экз. 30206

Рассмотрены вопросы устройства оснований и фундаментов промышленных н гражданскнх зданий н сооружеиий в спецнфическнх грунтовых условиях — на заболоченных террнториях. Освещены вопросы проектнрования н устройства фундаментов иа естественном основании в торфяных грунтвх, а также иа песчаных подушках и свайных фундаментах. Приведены особенностн органнзации и пронзводствв работ.

Книга предназначена для научных работииков н проектировщнков.

План 1979 г., № 309

Порхаев Г. В., Щелоков В. К. **Прогнознрованне температурного режнма вечномерзлых грунтов на застранваемых террнториях.** — Л.: Стройнздат, 1979 (III кв.). — 12 л., нл. — 1 р. 95 к. 4000 экз. 30206

В кннге иа основе большого материала натурных наблюдений и теплотехнических расчетов дается оценка нзменеинй температурного режима груитов в результате застройки территорин в разлнчных районах распространения вечномерзлых грунтов. Прнводятся практическне рекомендации по прогнозу температуриого режнма вечномерзлых груитов на застраиваемых террнторнях для обеспечення устойчивостн и эксплуатацнонной иадежности зданнй н сооруженнй.

Кинга преднвзначена для научных работников н проектировщиков.

План 1979 г., № 310

VI. ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОЕ ХОЗЯЙСТВО

1. Производственно-техническая литература

Логинов В. С. **Сооружения н объекты снабжения сжиженным газом.** — М.: Стройнздат, 1979 (I кв.). — 10 л., ил. — 55 к. 5000 экз. 30210

Даны рекомендацин по проектнрованию, строительству и эксплуатацни объектов снабжения сжнженным газом. Описаны прогрессивные индустрнальные методы, строительные конструкцин н материалы, используемые прн строительстве этнх объектов.

Кннга предназначена для нннженерно-техннческнх работников, занятых проектнрованием, строительством н эксплуатацней систем газоснабжения.

План 1979 г., № 311

При отказе местных магвзинов в прнеме заказов рекомендуем обращаться по вдресам:

117334, Москва, Ленинский проспект, 40, магазин № 115, отдел «Книга — почтой»,

195027, Ленинград, Большеохтинский пр., 3, магазин № 19 «Строительная книга».

СВОЕВРЕМЕННО ОФОРМИТЕ ЗАКАЗ. В РОЗНИЧНУЮ ПРОДАЖУ ЭТА ЛИТЕРАТУРА ПОСТУПАТЬ НЕ БУДЕТ.

Цена 65 коп.

